rudolf chafizovic zaripov

MUSICA CON IL CALCOLATORE

le regole matematiche della composizione

R. Ch. Zaripov è professore al Dipartimento di Matematica dell'Università di Mosca. Da molti anni è considerato un pioniere per aver iniziato lo studio matematico delle norme della musica tradizionale. Una precedente edizione di questo libro (come anche riferito da M. Kassler sulla rivista Perspective of New Music*) ha superato le 40 000 copie. I suoi sono i primi libri relativi alle applicazioni dei calcolatori alla musica, che non si limitano ai semplici e non misteriori schemi della musica ultramoderna.*

Emilio Gagliardo è stato professore di Analisi matematica alle Università di Genova, Kansas, Chicago, Oregon, Pavia. Nel 1974, finanziato dalla National Science Foundation ha organizzato presso l'Università dell'Oregon un concerto di musica classica composta con un programma chiamato ABIOMELOS e suonata da musicisti. È autore del libro L'automazione dell'intelligenza.

MANUALI SCIENTIFICI
Serie diretta da Mauro Boscarol

Martin Cripps, L'hardware dei computer
Emilio Gagliardo, L'analisi matematica
Rudolf Zaripov, Musica con il calcolatore

rudolf chafizovic zaripov

MUSICA CON IL CALCOLATORE

le regole matematiche
della composizione

franco muzzio & c. editore

Questo volume è una traduzione dei capitoli 1-7 di "Kibernetika i Muzyka", ed. Nauka, Accademia delle Scienze dell'URSS, Mosca 1971

Traduzione di Rolando Dotti e Sieglinde Gruber
Revisione e adattamento di Emilio Gagliardo

Prima edizione: ottobre 1979

ISBN 88-7021-101-1

© 1979 franco muzzio & c. editore
Via Bonporti 36, 35100 Padova, tel. 049/661147-661873
Tutti i diritti sono riservati

Presentazione

È attualmente diffuso l'interesse per le applicazioni dei calcolatori elettronici in problemi scientifici e anche nel mondo dell'arte. In particolare le applicazioni dei calcolatori elettronici alla musica presentano alcune caratteristiche che rendono in un certo senso ideale questo nuovo campo di studio.
La presente monografia è dedicata all'esame di questo attuale problema con particolare riferimento ad alcuni aspetti dell'attività del compositore di musica.
Vengono accennati i primi tentativi di composizione con l'aiuto di calcoli matematico-probabilistici o con mezzi equivalenti (come ad esempio il metodo proposto per passatempo da Mozart). Viene esposta una rassegna sugli studi svolti in tutto il mondo sull'aiuto che le macchine elettroniche possono fornire per la composizione o per l'analisi della musica. Vengono anche riferiti i lavori fatti sulla sintetizzazione elettronica di suoni musicali con applicazioni alle ricerche acustiche e psicofisiologiche.
La parte centrale del libro espone il complesso delle regole trovate dall'Autore per rendere la macchina elettronica capace di realizzare un modello che simula l'attività di un compositore. I vari aspetti della musica (ritmo, armonia, melodia) vengono approssimati con schemi utili per la composizione, o anche per l'analisi critica delle composizioni di un allievo, o infine per esperimenti sulla percezione musicale.
La monografia spiega i principi della algoritmizzazione (cioè della schematizzazione con regole matematiche operative), descrive esempi e illustrazioni musicali, e intende essere utile anche a coloro che effettuano analoghe ricerche sui modelli scientifici di altre attività, con l'aiuto della cibernetica.

Indice generale

Introduzione all'edizione italiana 9

1. **Modelli di attività umane** - Problemi e metodi di studio con i calcolatori elettronici 19

2. **Anche la melodia è soggetta a regole** 25
   2.1 La melodia è l'elemento fondamentale dell'opera musicale 2.2 Analisi della melodia 2.3 Variazione di una melodia

3. **Sui mezzi meccanici di composizione musicale** 40

4. **Rassegna di ricerche sulle applicazioni dei calcolatori elettronici alla musica** 46
   4.1 Composizione mediante macchine elettroniche 4.2 Analisi delle composizioni musicali 4.3 Sintetizzazione automatica del suono

5. **Un linguaggio algoritmico musicale** 78
   5.1 Gli elementi delle composizioni musicali e la loro codificazione 5.2 Operazioni sulle altezze e sugli intervalli 5.3 Scelta casuale di elementi 5.4 Principi generali dell'algoritmo di composizione 5.5 Corrispondenza fra il tipo di composizione e i valori dei parametri

6. **Composizioni di melodie con il calcolatore elettronico** 95
   6.1 Elementi fondamentali del calcolo di melodie 6.2 Gruppi ritmici e melodici 6.3 Strutture del periodo musicale 6.4 Calcolo della melodia 6.5 Alcune particolarità del programma 6.6 Schema a blocchi del programma

7. **Calcolo automatico del ritmo per comporre una canzone con versi assegnati** 121
7.1 Ritmo dei versi, ritmo della canzone, ritmo della melodia 7.2 Elementi fondamentali del ritmo 7.3 Codificazione degli elementi del ritmo 7.4 Calcolo del ritmo della canzone 7.5 Alcune particolarità del programma

Appendici 134
1 Alcune melodie composte dalla macchina URAL 2 Alcune composizioni della macchina URAL-2 ottenute con l'algoritmo descritto nel capitolo 6 3 Alcune canzoni composte dalla macchina URAL-2 con l'algoritmo descritto nel capitolo 7 su un ritmo di versi assegnato 4 Armonizzazioni di melodie ottenute dalla macchina URAL-2 con un programma che traduce le regole dell'armonia classica nel linguaggio matematico introdotto nel capitolo 5

Bibliografia 155

Indice analitico 167

Come si leggono i nomi russi

Simbolo grafico	*Suono*	*Pronuncia*
č	c-	come nell'it. *cena*
ž	j-	come nel franc. *jeunesse*
š	-sc-	come nell'it. *ascissa*
c	-zz-	come nell'it. *pezzo*
z	-s-	come nell'it. *rosa*
ch	h- aspirata	come nell'ingl. *hard*
k	c-	come nell'it. *contatto*
y	-u-	come nel franc. *fumé*

Per la translitterazione dei nomi russi del testo e della bibliografia, sono stati usati i criteri di trascrizione scientifica.

Introduzione all'edizione italiana

La traduzione in lingua italiana di questo libro, al centro di attività culturali da altri tentate senza successo, era stata richiesta come indispensabile per avere idee chiare sul ruolo dell'intelligenza umana (aiutata dalle macchine elettroniche) nel mondo della musica (e precisamente della musica *non* elettronica) ed era stata promessa in circostanze che meritano di essere brevemente raccontate.

Un discorso introduttivo potrebbe iniziare richiamando lo spirito della matematica che nel corpo delle macchine elettroniche svolge prosperosamente molte attività e che ha sempre rappresentato il contributo della logica umana per la comprensione, previsione e guida di ciò che avviene attorno a noi e di molte nostre attività. La parola chiave è *modello* matematico cioè schema di regole matematiche seguendo le quali si imita l'andamento di un processo reale o possibile. L'aiuto delle macchine elettroniche (che con locuzione più distinta chiamiamo *elaboratori elettronici*) consiste nella possibilità di ottenere il risultato di modelli piuttosto complessi seguendo le moltissime regole in modo ordinato, esatto e osservabile (prescindendo dai troppo numerosi dettagli di calcoli).

Come viene segnalato in questo libro lo studio di modelli matematici per la composizione musicale presenta molti aspetti interessanti: mentre come è noto certi rinomati stili di musica moderna consistono in leggi schematiche

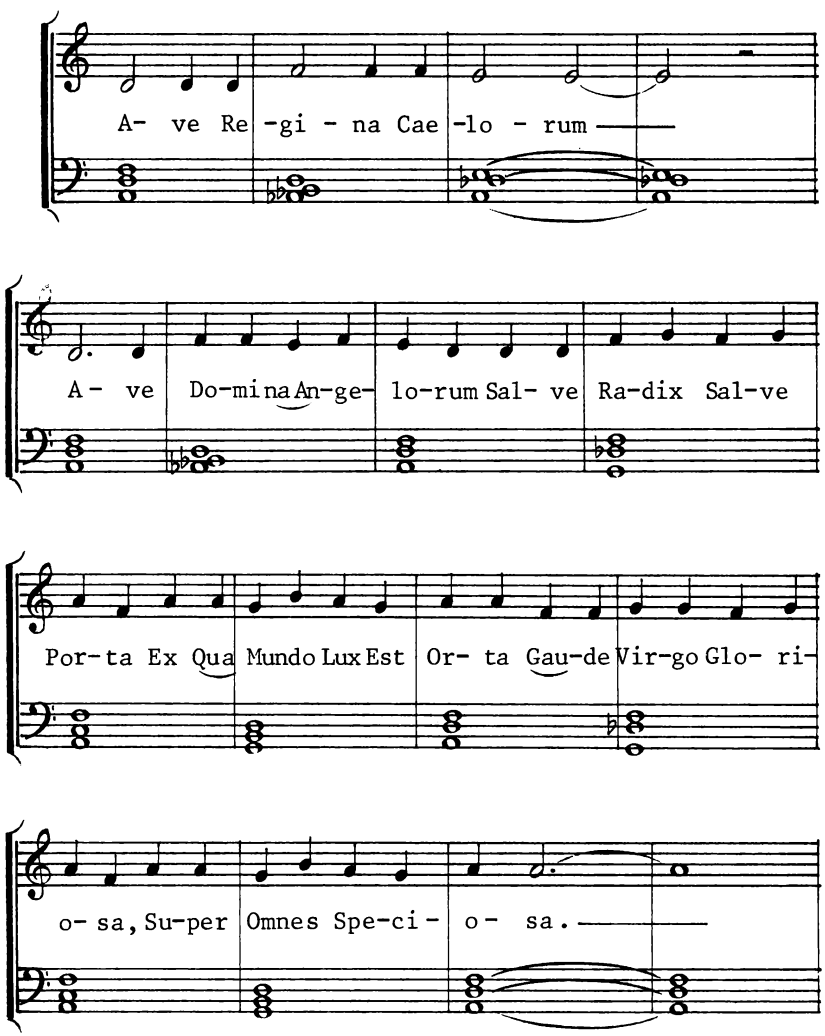
abbastanza semplici per essere seguite dall'uomo, usando invece macchine elettroniche si possono sviluppare modelli matematici assai più preziosamente complessi che consentono di comporre musiche in uno stile più vicino a quello della musica classica. Purtroppo i primi tentativi di musica « intenzionalmente classica » composta con macchine elettroniche hanno invece raggiunto esclusivamente una grande notorietà con composizioni che anche se eseguite da un valente quartetto d'archi hanno sapore esclusivamente ultramoderno, e hanno spinto il pubblico verso l'opinione pessimistica secondo cui la musica composta con la matematica e con le macchine elettroniche non può che essere musica elettronica ultramoderna. Di conseguenza sono sorti molti gruppi di studio musico-cibernetici dedicati alla esecuzione della musica con mezzi elettronici che simulano i suoni di strumenti tradizionali o anche emettono rumori nuovi.

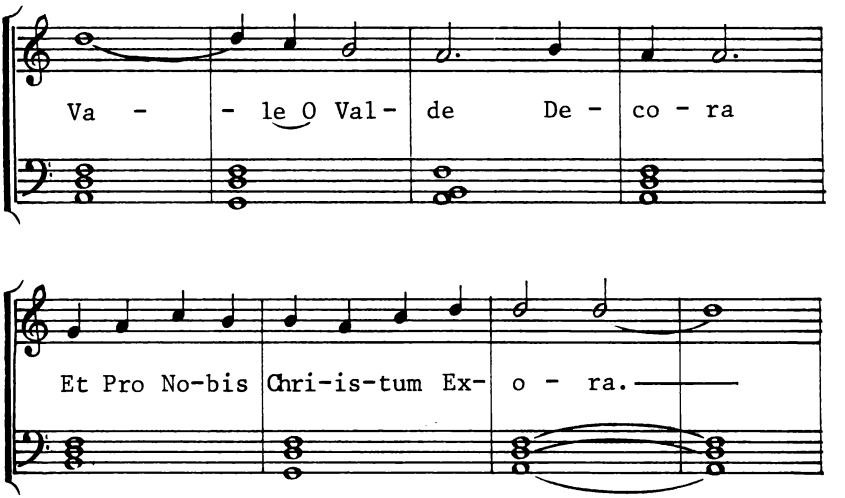
Una grande sorpresa si è dunque avuta quando si è saputo che R. Ch. Zaripov, professore all'Università di Mosca, da una ventina di anni affronta con lo strumento della macchina elettronica URAL il problema di studiare razionalmente la musica classica. Quale è lo scopo delle schematizzazioni, delle analisi matematiche e delle statistiche che egli compie su Vivaldi, Palestrina, Bach, Beethoven, Čiajkovskij, e su molti altri compositori? In molti articoli sull'argomento, alcuni dei quali tradotti in inglese per iniziativa della nota rivista *Perspectives of new music*, e specialmente in questo libro viene spiegato dettagliatamente il linguaggio matematico che questo pioniere ha scoperto nelle creazioni musicali del passato come una trama nascosta e meravigliosamente complessa. I grandi compositori del passato ubbidivano istintivamente a queste regole che soltanto le moderne macchine elettroniche possono esplicitamente manipolare. Si tratta dunque di uno studio archeologico? Sembra di dover escludere questa interpretazione: le musiche composte automaticamente, raccolte in fine al libro, mostrano che *non* ci si muove verso composizioni "postume" dei maestri classici, ma piuttosto verso un nuovo stile di composizione "non moderno" (come piace tanto a Zaripov precisare) ma nemmeno classico: una evoluzione musicale che sarebbe stata possibile se i compositori fossero stati diversamente influenzati. Variando leggermente le formule di Zaripov potremo conoscere e guidare altri possibili sviluppi musicali verso composizioni che conterranno nuovi "messaggi".

A proposito di "messaggi umani" contenuti nella musica composta con o

senza l'aiuto della matematica, il prof. Egorov, collega di Zaripov, ci ha raccontato un curioso episodio. Un articolo di Zaripov, che conteneva in due figure affiancate una musica composta con la macchina elettronica e una musica scritta da un compositore moderno, era stato fortemente criticato dalla stampa con l'accusa di "mancanza di messaggi umani" nella prima delle due figure. Seguì un articolo di Zaripov con la precisazione che le musiche contenute nelle due figure per errore tipografico erano state invertite di posto.
Alcune musiche composte mediante il programma di Zaripov furono incluse nel concerto di musiche composte da macchine elettroniche ed eseguite da musicisti mediante organo a canne, violino e pianoforte presso l'Università dell'Oregon nel 1975, dove fu anche tentato dallo scrivente un programma chiamato ABIOMELOS per la composizione di musica classica. Una versione modificata di ABIOMELOS ha consentito di effettuare mediante il calcolatore elettronico dell'Università di Pavia un primo esperimento pubblico di composizione: come segnalato sulla *Gazzetta del Popolo* del 26 aprile 1978 il pubblico è stato invitato a proporre alcuni temi, e il tema scelto mediante votazione è stato trasmesso alla macchina elettronica che ne ha immediatamente ricavato e stampato 14 variazioni con accompagnamento, subito eseguite al pianoforte. Tre di queste variazioni sono state pubblicate in un articolo di cronaca sulla rivista *Strumenti e Musica*. Con qualche correzione umana esse diventano preferibili al tema originale, mentre le altre variazioni erano meno gradevoli. Durante la discussione è stato da molti richiesto che anzitutto il presente libro venisse tradotto in italiano per far conoscere le teorie basilari sulle quali questi studi sono costruiti. La promessa di curarne la traduzione è stata fatta ed è ora mantenuta.
Una nuova possibilità va delineandosi: come si è detto alcuni ritocchi umani hanno migliorato alcune musiche composte dalla macchina elettronica. D'altra parte le musiche composte dalla macchina, pur essendo il frutto del programma ideato dall'uomo, si allontanano a causa della complessità dei calcoli dalle previsioni teoriche del programmatore, e talvolta questo "sfuggire" al controllo umano mentre rende piuttosto sgradevoli alcuni passaggi conferisce ad altri un'impronta nuova che può positivamente ispirare anche un compositore alla ricerca di nuovi linguaggi musicali.
Nasce così la possibilità di comporre musica "in collaborazione" tra la macchina e l'uomo. Ad esempio un semplice riordinamento delle battute effettuato

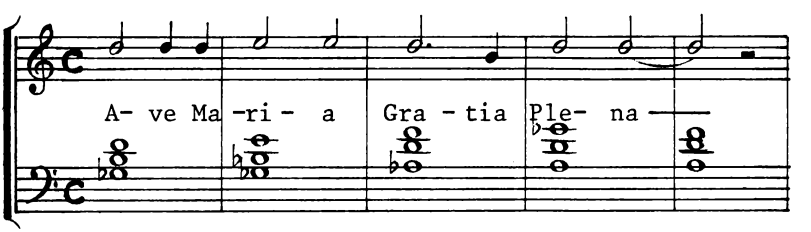
dallo scrivente sull'ultima musica contenuta in appendice (dopo aver isolato le singole voci) ha dato luogo alla seguente melodia:

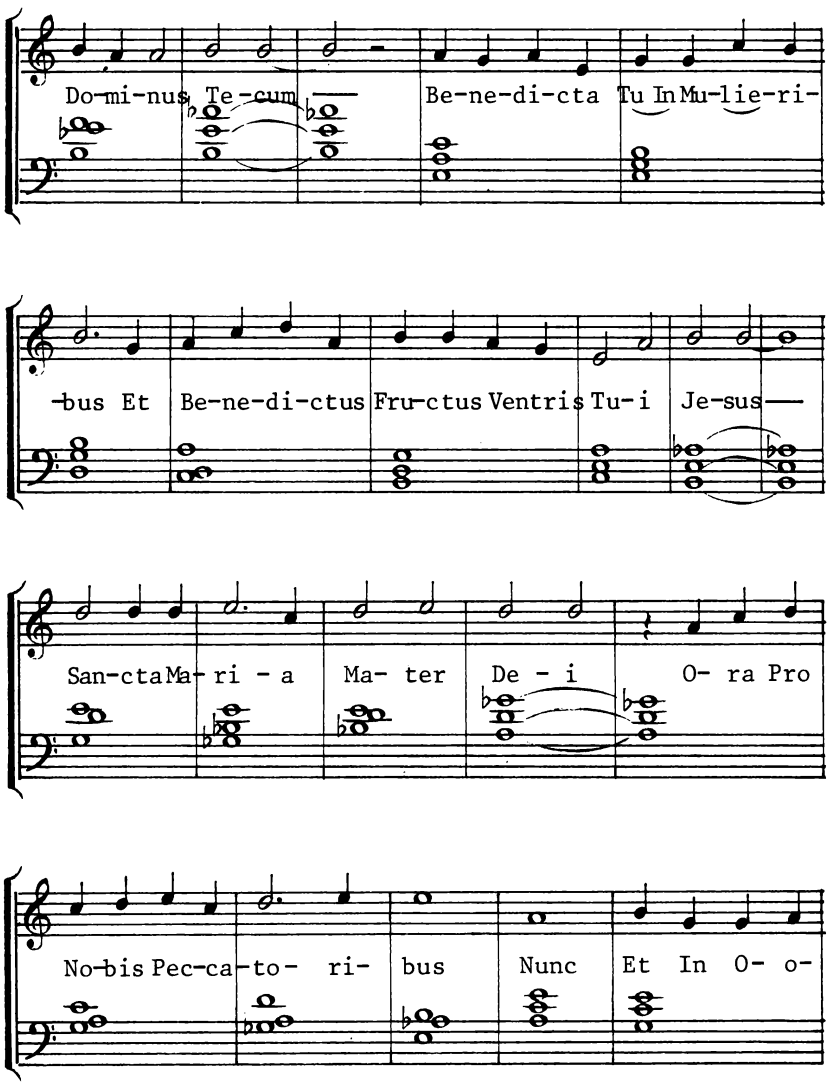


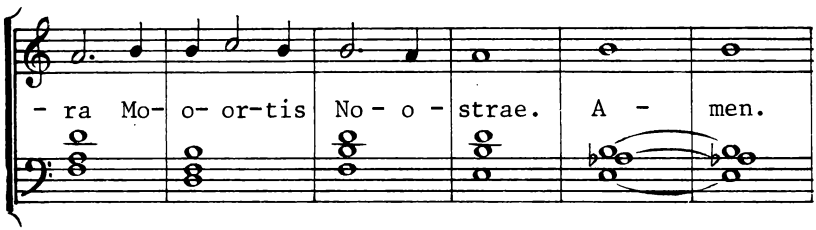


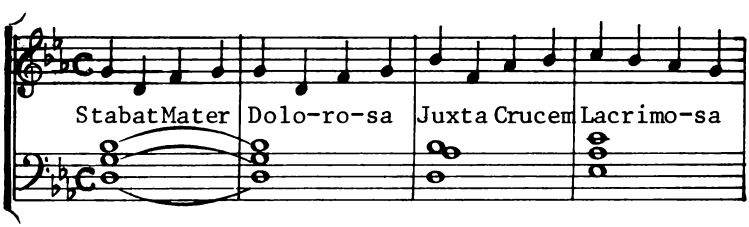
che è stata inviata all'Autore di questo libro. Egli ha cortesemente risposto chiedendo il permesso di pubblicarla anche in Russia.

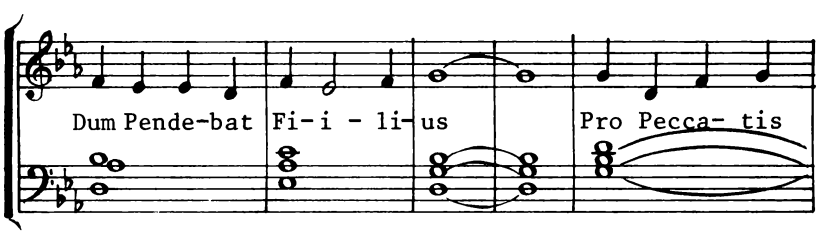
Per investigare le possibilità della collaborazione tra la macchina e l'uomo, lo scrivente ha analizzato matematicamente molti canti gregoriani e ha ottenuto, con l'aiuto del programma ABIOMELOS e con scelte e modifiche umane, alcuni brani come i seguenti:

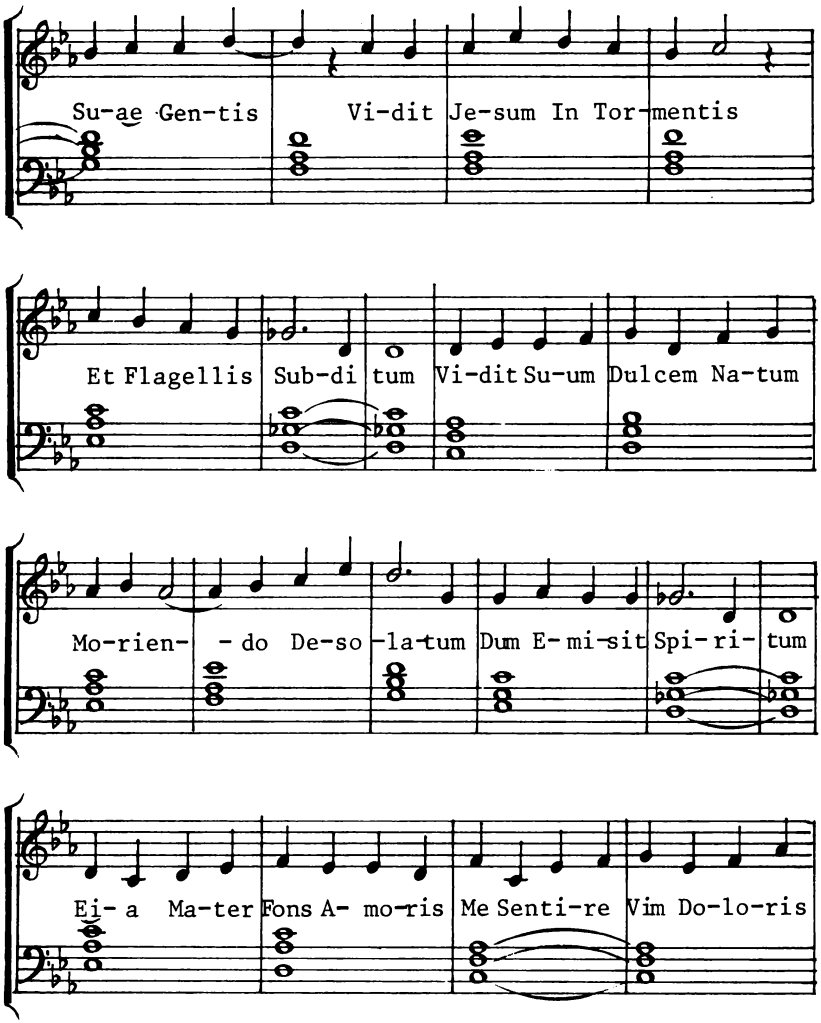


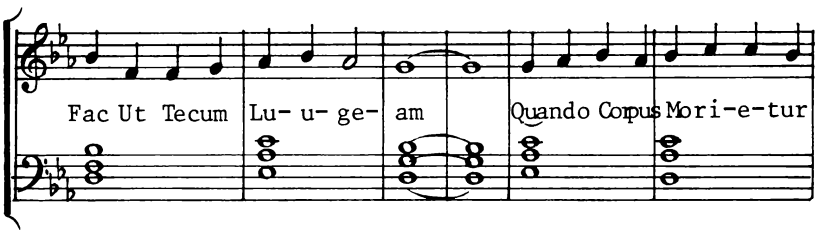

Do-mi-nus Te-cum
Be-ne-di-cta Tu In Mu-lie-ri-
-bus Et Be-ne-di-ctus Fru-ctus Ventris Tu-i Je-sus
San-cta Ma-ri - a Ma- ter De - i O- ra Pro
No-bis Pec-ca-to- ri- bus Nunc Et In O- o-

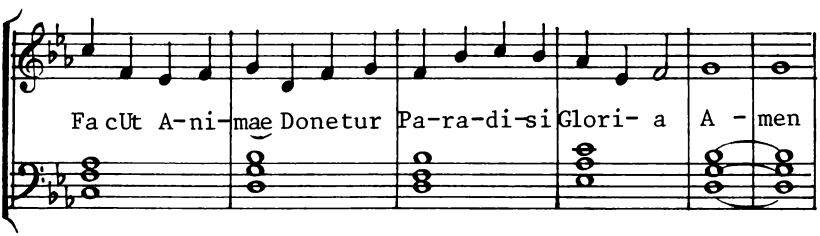

- ra Mo- o- or-tis No - o - strae. A - men.

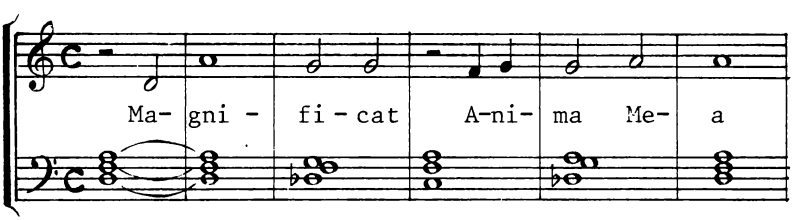

StabatMater Dolo-ro-sa Juxta Crucem Lacrimo-sa

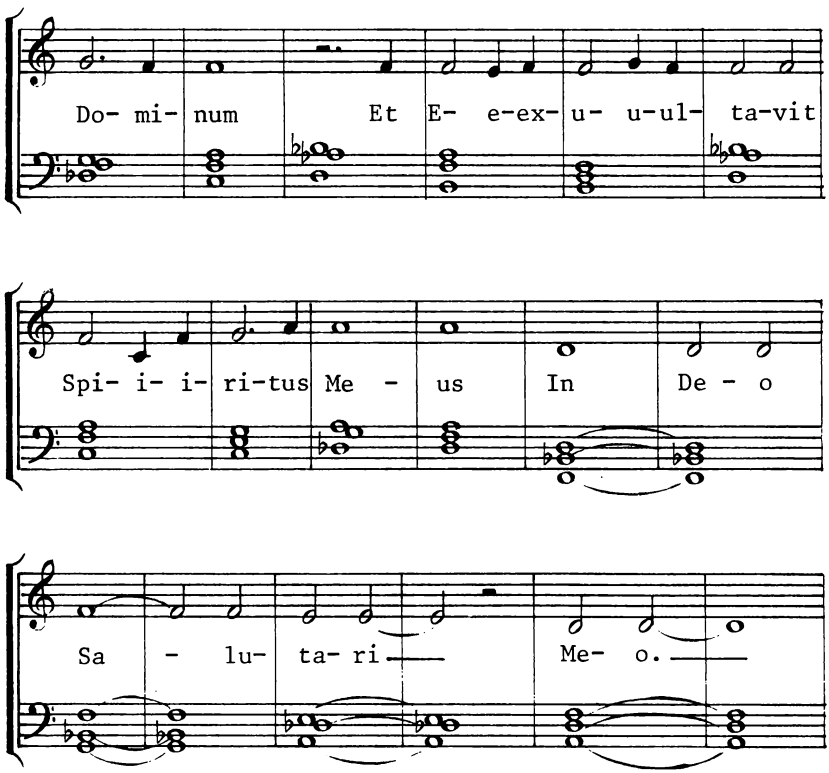

Dum Pende-bat Fi-i - li-us Pro Pecca- tis


Su-ae Gen-tis Vi-dit Je-sum In Tor-mentis
Et Flagellis Sub-di tum Vi-dit Su-um Dulcem Na-tum
Mo-rien- - do De-so-la-tum Dum E-mi-sit Spi-ri-tum
Ei- a Ma-ter Fons A- mo-ris Me Senti-re Vim Do-lo-ris


Fac Ut Tecum Lu- u- ge- am
Quando Corpus Mori-e-tur


Fa cUt A-ni-mae Donetur Pa-ra-di-si Glori- a A - men


Ma- gni - fi - cat A-ni- ma Me- a



Concludiamo ringraziando il prof. Zaripov che ha cortesemente consentito di pubblicare la traduzione italiana di questo suo libro. Tale opera appare come un lavoro molto pregevole al nostro gruppo di matematici (in particolare: M.L. Bernardi, P. Fornasari, G. Gilardi), e sarà certamente da considerare un punto di partenza per quanti vorranno dedicarsi a questo nuovissimo ramo della matematica.

Forse il lettore troverà curioso il fatto che i metodi statistici applicati in queste ricerche musicali sono gli stessi metodi che lo scrivente adopera principalmente per trattare problemi statistici di Scienze Naturali e di Medicina.

Emilio Gagliardo
Università di Pavia

1

Modelli di attività umane Problemi e metodi di studio con i calcolatori elettronici

L'avvento dei calcolatori elettronici ha allargato la sfera dei problemi legati ad attività mentali che possono essere schematizzate con algoritmi, cioè con regole matematiche in modo da ottenere un modello i cui simboli corrispondono alle informazioni sul processo in esame.

I processi mentali artistici e scientifici, oltre a particolarità specifiche, hanno anche qualità in comune: ogni creazione della mente è basata sulla intuizione che a sua volta è ovviamente influenzata dall'esperienza dell'uomo, svariata e acquisita in molti modi.

Così ad esempio le strutture musicali melodiche, armoniche, ritmiche possono formarsi nella coscienza e nella memoria del compositore in conseguenza di un apprendimento musicale ragionato oppure anche in modo spontaneo semplicemente ascoltando musica.

Nell'uno e nell'altro caso si forma l'abitudine a certe caratteristiche strutturali che aderiscono a correlazioni logiche, anche se queste non vengono razionalmente avvertite.

Nella coscienza del compositore la musica sorge come un "impeto di ispirazione", un "atto creativo unico", e non sempre egli si rende conto perché una

composizione suona meglio di un'altra e perché sia sorta e si sia così sviluppata una sua composizione nella sua coscienza.
Analogamente nelle altre arti come ad esempio nella pittura, nella poesia, ecc. la scelta della forma non è il risultato di un apprendimento logico e rigoroso ma di intuizioni inconsce.
Anche la scoperta scientifica, che pur gioca un ruolo importante nella creazione artistica, richiede essenzialmente intuizione. All'inizio di una ricerca il matematico non sa dimostrare un nuovo teorema, non sa se potrà farlo, e in seguito non sarà in grado di spiegare come gli sia venuta l'idea che ha risolto il problema: si è trattato di una intuizione.
Nei ragionamenti che precedono la scelta di una mossa il giocatore di scacchi giunge sovente alla soluzione con una "astuzia" frutto di un "lampo di genio" intuitivo.
Sebbene sia difficile comprendere chiaramente questi processi intuitivi, oggi con nuovi metodi di ricerca possiamo scoprire in essi strutture descrivibili con algoritmi matematici. È superfluo osservare che questo studio contribuirà ad una saggia organizzazione del lavoro mentale rendendo le macchine capaci di risparmiare all'uomo gli aspetti standardizzati che sprecherebbero le nostre energie intellettuali, preziose per attività umane propriamente creative.
È dunque compito della scienza, di interesse pratico, quello di delineare gli aspetti logici delle intuizioni creative.
La difficoltà di questa indagine non consente una esatta descrizione: sorgono così discussioni e vengono formulate congetture, cioè ipotesi più o meno confermate. La conferma di una ipotesi si può ottenere formulando un modello basato sull'ipotesi e sperimentandone il funzionamento mediante un calcolatore elettronico. È questo uno dei compiti della cibernetica.
La *modellazione* consiste nel cercare di comprendere la logica di un certo processo, e nell'approssimare il suo funzionamento con un insieme di regole che tengono anche conto di numerose statistiche fatte sul processo. In tale modo il processo viene descritto in termini matematici e il suo funzionamento può essere allora riprodotto con un calcolatore elettronico. Molti dettagli del modello possono poi essere modificati in modo da migliorare l'approssimazione del funzionamento.
Modellando ad esempio il processo della composizione musicale è possibile sperimentare l'effettiva importanza di certe norme musicali desunte da certe

statistiche (talvolta sostanziali e talvolta fortuite).
La macchina "capisce" soltanto il linguaggio delle formule e dei numeri e non, evidentemente, il manuale di composizione o il trattato sulla pittura. Di conseguenza tutti i concetti introdotti nella macchina devono essere rigorosamente definiti e codificati nel linguaggio della macchina. È noto che questo linguaggio può essere ampliato per nostra comodità, ma sempre rimane rigoroso.
Sono noti molti esperimenti effettuati con macchine elettroniche per ottenere modelli di attività intellettuali. Ricordiamo i metodi per la dimostrazione automatica dei teoremi [122, 87], per la traduzione automatica da una lingua all'altra [79], il riconoscimento automatico delle forme, il gioco degli scacchi o altri giochi [7, 9, 25, 88, 95, 111], ecc.
Tra queste ricerche, in particolare lo studio per ottenere un modello matematico della composizione musicale appare privilegiato.
Una composizione musicale si può collegare piuttosto all'espressione che alle forme particolari di una pittura o scultura. In altre parole anche tra svariate intonazioni possibili il contenuto della musica sta su un piano più "astratto" dove l'analisi logico-matematica è forse più facile, potendo prescindere da concrete e pesanti tecniche specifiche delle varie arti figurative.
Tuttavia anche se i risultati dei modelli realizzati con macchine elettroniche per le arti figurative e la poesia non hanno potuto, di conseguenza, raggiungere il livello soddisfacente raggiunto nella musica (secondo una valutazione di massa degli ascoltatori), è ciononostante opportuno considerare il panorama generale di tutti questi tentativi.
A questo punto è il caso di parlare delle cosiddette macchine per la composizione automatica di poesie, in quanto su questo argomento le nostre edizioni divulgative hanno divulgato molta mancanza di informazione.
I versi più noti usciti dalla macchina iniziano così:

La notte sembra più nera di questo gatto . . .

Questa poesia fu pubblicata per la prima volta nel 1959 nel libro *Più in fretta del pensiero* di N. Kobrinski e V. Pekelis, ripubblicato in seconda edizione nel 1963, e dopo essere comparsa in altre pubblicazioni diventò oggetto di attenzione di poeti, critici, scienziati, e della *Tribuna dell'Unione Scrittori delle Repubbliche Federative Socialiste.*
Generalmente parlando questi versi furono accolti col beneficio dell'inventario,

e furono anche definiti "inattuali", "nebulosi", validi solo in quanto la rima era corretta, "ciarlataneschi", preferibili soltanto rispetto a quelli dei poeti moderni.

È obiettivamente difficile valutare poesie: non sempre è facile apprezzare in esse un messaggio umano, e non parliamo di quelle fatte dalle macchine. Certamente è più facile criticarle: in un certo senso è più sicuro.

Si è anche letto sulla stampa che è venuto alla luce un imbroglio: poesie fatte da qualcuno che pretendeva averle ottenute con una macchina.

Per quanto riguarda le traduzioni in altra lingua di versi fatti da una macchina bisogna osservare che inevitabilmente la traduzione fatta dall'uomo altera lo "stile" della macchina anche se il traduttore fa tutto il possibile per esprimere la propria idea sulla "creatività" della macchina, e così facendo conferisce ai versi un valore umano, estraneo.

Si giunge così a preferire, tra le varie attività mentali che possono essere approssimate con un modello matematico realizzabile con un calcolatore elettronico, l'attività della composizione musicale. È incoraggiante il fatto che già nella fase attuale di queste ricerche è stato provato che la macchina è capace di eseguire alcune operazioni che fanno parte delle strutture osservabili nei processi creativi musicali come anche nei lavori di analisi di brani musicali. In queste ricerche ci si trova nella condizione di chi scopre le leggi della natura. La macchina elettronica consente di proseguire e sviluppare la teoria musicale creata dai professori di musica, e consente in particolare di controllare la validità delle loro congetture. È dunque importante tener presente che la teoria musicale non ha mai preteso sostituire i compositori. Rifiutare la modellazione musicale con macchine elettroniche vorrebbe dunque dire rifiutare lo sviluppo della teoria musicale e cioè rifiutare di comprenderne gli scopi.

Questo rifiuto non può convincere nessuno a credere che le macchine potranno sempre soltanto imitare le opere già note e non riusciranno mai a comporre nuove strutture musicali capaci di anticipare lo stile dei futuri compositori. Ci limitiamo qui a osservare che il problema essenziale (e di gran lunga il più difficile) consiste nel selezionare le strutture stilistiche piuttosto che nel crearne molte. Tra parentesi un tale problema nasce anche in altre applicazioni della cibernetica, come ad esempio nel lavoro del matematico Wang [122] sui teoremi dimostrati dalle macchine. Il punto essenziale consiste nella ricerca di un algoritmo capace di determinare il valore (banale o interessante) di un teorema,

per meglio organizzare l'attività della macchina che, per così dire, "pensa". In generale il discorso sulle difficoltà che si possono affrontare per trovare un modello matematico di una attività mentale (v. [41, 2]) va fatto distinguendo le possibilità puramente teoriche da quelle praticamente realizzabili anche se in un futuro non molto vicino, al fine di evitare discussioni prive di senso. Attualmente ciò che frena lo sviluppo della modellazione non è una difficoltà di principio ma prima di tutto l'insufficiente attenzione che viene prestata a questa serie di problemi e le limitazioni o inadeguatezze delle apparecchiature e dei mezzi oggi a nostra disposizione.

Ritornando, in particolare, alle applicazioni della matematica alla musica, cioè al problema cui è dedicato questo libro, è interessante osservare che i primi tentativi risalgono a grandissimi compositori del passato come Haydn, Händel, Mozart, e altri.

Il procedimento matematico viene reso potente con l'uso della macchina elettronica. La macchina viene usata per l'indagine strutturale e statistica delle opere musicali, per scoprire leggi generali o specifiche di alcune classi di composizioni, per l'analisi e la descrizione di un brano, per l'interpretazione matematica delle strutture trovate, e infine per la composizione di brani musicali. È facile usare le macchine come strumenti musicali, imitando il timbro degli strumenti classici o creare nuovi timbri superando facilmente le limitazioni fisiche degli strumenti. Questi esperimenti possono aiutare alcune ricerche acustiche o psicofisiologiche legate alla percezione del suono.

In questo libro vengono descritte le esperienze dell'autore sui modelli realizzati con macchine elettroniche per la composizione e per l'analisi musicale. Un primo algoritmo, analizzando una poesia, determina il ritmo della canzone sulla base del ritmo contenuto nei versi. Ad esso si collega un altro algoritmo che determina in corrispondenza l'andamento di una possibile melodia.

Il problema delle "variazioni" di una melodia viene studiato decomponendo, per così dire, una melodia nei suoi vari aspetti che la descrivono, e ricomponendola dopo averne mutati alcuni, anche solo parzialmente.

A differenza di tutti gli altri lavori noti sulla composizione con macchine, il metodo di algoritmizzazione qui descritto è anzitutto basato sulla organizzazione gerarchica, a più livelli logici, di vari concetti musicali, norme, caratteristiche strutturali, forme musicali, ecc. Tutti questi valori logici possono adattarsi alle circostanze e possono essere variati dal programmatore. Grazie a

questa disciplina gerarchica il processo di composizione inizia con la determinazione di uno schema generale che prevede l'organizzazione dell'opera con suddivisioni in proposizioni musicali, frasi musicali, motivi, che verranno variati nella melodia, nel ritmo, nell'armonia, e verranno collocati al posto prefissato. La scelta fatta dal programmatore dei parametri che presiedono all'organizzazione generale dà luogo a diversi tipi di composizione. Con la musica composta la macchina stampa anche i valori dei parametri che ne hanno determinato lo stile, permettendo così di effettuare esperimenti utili anche per giungere a concetti musicali più complicati e per controllare la validità di congetture.

Si possono così ottenere stili di composizione diversi da quelli presi per l'analisi, anticipando possibili stili di futuri compositori.

L'esposizione è illustrata con esempi di brani noti e di brani composti dalle macchine URAL e URAL-2.

Si suppone da parte del lettore la conoscenza dei termini musicali più elementari e delle espressioni di uso corrente nella musica.

2

Anche la melodia è soggetta a regole

2.1 *La melodia è l'elemento fondamentale dell'opera musicale*

Ricordando una canzone, una danza, o una sinfonia prima di tutto noi riproduciamo la melodia che si può cantare o suonare ad una sola voce, per esempio sul pianoforte "con un solo dito". Ascoltando variazioni di un tema e riconoscendo in esse l'elemento comune si ritorna alla melodia fondamentale.
Gli altri aspetti della musica (contrappunto, armonia, accompagnamento) esigono una percezione più formale-razionalistica.
Come è noto la melodia viene composta "nell'impeto della ispirazione" in un "atto creativo" che si percepisce come "unico": la melodia sorge improvvisamente nella coscienza del compositore ed egli non suddivide in singoli atti elementari tutto il complesso processo della sua intuizione che rimane inconscio. Il compositore non si rende conto perché proprio quella combinazione di note e non un'altra è stata da lui scelta per l'espressione di un determinato sentimento, e non è in grado di spiegare gli elementi che caratterizzano il suo stile.
E ciò nonostante le regole strutturali delle melodie esistono: i compositori inconsciamente le seguono, come risulta analizzando le loro opere. L'intuizione inconscia dei compositori è basata su esperienze precedenti acquisite nel

periodo di studio oppure ascoltando musica. I risultati possono essere sorprendenti: ad esempio il minorenne Mozart prima di studiare armonia compose della musica eccellente che soddisfaceva le esigenze di armonizzazione del suo tempo.

In questo capitolo analizzeremo alcune semplici melodie *non* per commentarle esteticamente ma per individuare in esse alcune caratteristiche strutturali che si manifestano stabilmente nelle varie composizioni.

È superfluo avvertire che *non* consideriamo gli aspetti che riguardano l'esecuzione come ad esempio la voce di soprano o di basso, lo strumento, l'intensità del suono, e le indicazioni interpretative come "staccato", "legato", ecc.

Concentreremo l'analisi delle melodie sui seguenti quattro aspetti: 1° = ritmo, 2° = andamento della linea melodica, 3° = struttura generale, 4° = ruolo delle varie note rispetto all'armonia fondamentale, in quanto questo tipo di analisi permette di giungere a modelli matematici di regole musicali per la composizione automatica.

Come già avvertito *non* verrà effettuata una completa analisi estetica delle melodie, analisi che come è noto è spesso soggettiva in quanto non si conoscono criteri oggettivi per una valutazione delle opere artistiche. Le valutazioni storico-culturali sono spesso addirittura discordi nel significato delle stesse parole e contradditorie, essendo influenzato da diverse "informazioni".

A questo proposito non si può tacere su alcuni metodi della cibernetica che intendono contribuire a dare una valutazione obiettiva di una "informazione" come il "messaggio" trasmesso da una composizione artistica. A grandi linee uno di questi metodi, elaborato da Ju. A. Šrejder [120], si può così riassumere: consideriamo l'informazione I fornita da una comunicazione C. La quantità di informazione I ricevuta dipende anche dalla condizione in cui si trova chi la riceve e in particolare dall'insieme delle cognizioni che egli ha già acquisito. Questo insieme si chiama con parola di origine greca il *thesaurus*. Esso condiziona le capacità di una persona di percepire altre comunicazioni traendone nuove informazioni. Possiamo dunque scrivere la formula matematica $I = I(C, Th)$ per indicare che la quantità di informazione ricevuta I dipende dalla comunicazione C e dipende anche dal thesaurus Th. Per ogni comunicazione C ci sono due casi estremi nei quali l'informazione ricevuta I è zero: quando Th è troppo povero e non consente di comprendere C, e quando Th è troppo ricco e C era già conosciuto. Prendiamo ad esempio come C un libro di calcolo infini-

tesimale: un bambino non ne ricava alcuna informazione, uno studente di matematica ne ricava il massimo di informazione, e un professore di analisi matematica di nuovo non ne ricava alcuna nuova informazione.
Analogamente nella percezione della musica l'informazione artistica è massima quando la composizione si distacca ma non troppo dagli schemi che l'ascoltatore prevede.

2.2 *Analisi della melodia*

Per iniziare lo studio delle regole fondamentali di composizione consideriamo ad esempio la canzone nota in tutto il mondo *Čižik-pyžik*. È difficile trovare una persona che non abbia mai suonato al pianoforte questa melodia. È una melodia primitiva ed eccezionalmente semplice ma nello stesso tempo serve come esempio fortunato di una opera musicale compiuta secondo tutte le principali regole. Di questa melodia esamineremo appunto i quattro aspetti precedentemente elencati. Altre regole che non emergono in *Čižik-pyžik* verranno desunte da altre canzoni popolari.

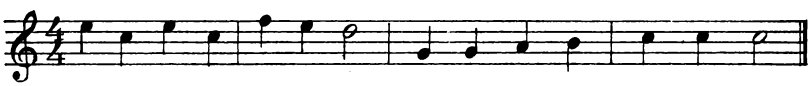


Fig. 1. Melodia *Čižik*.

1. Consideriamo anzitutto la durata delle note nella rappresentazione ritmica della melodia *Čižik* (Fig. 2), suddividendo con sbarre verticali la melodia in quattro battute con tempo 4/4 ciascuna. Le note indicate con ♩ , 𝅗𝅥 occupano rispettivamente 1/4, 2/4 del tempo, come riteniamo noto al lettore.
Il tempo di 4/4 per battuta è il più comune; molto comune è anche il tempo 3/4 (Fig. 3).

Fig. 2. Ritmo *Čižik*.

Esistono molte altre misure di tempi, ad es. 2/4, 6/8, 5/4 che qui non verranno presi in esame. Quasi tutti, in sostanza, si riducono ai tempi 4/4, 3/4. Così ad esempio una battuta col tempo 6/8 può essere scritta come due battute col tempo 3/4 (da suonare velocemente).

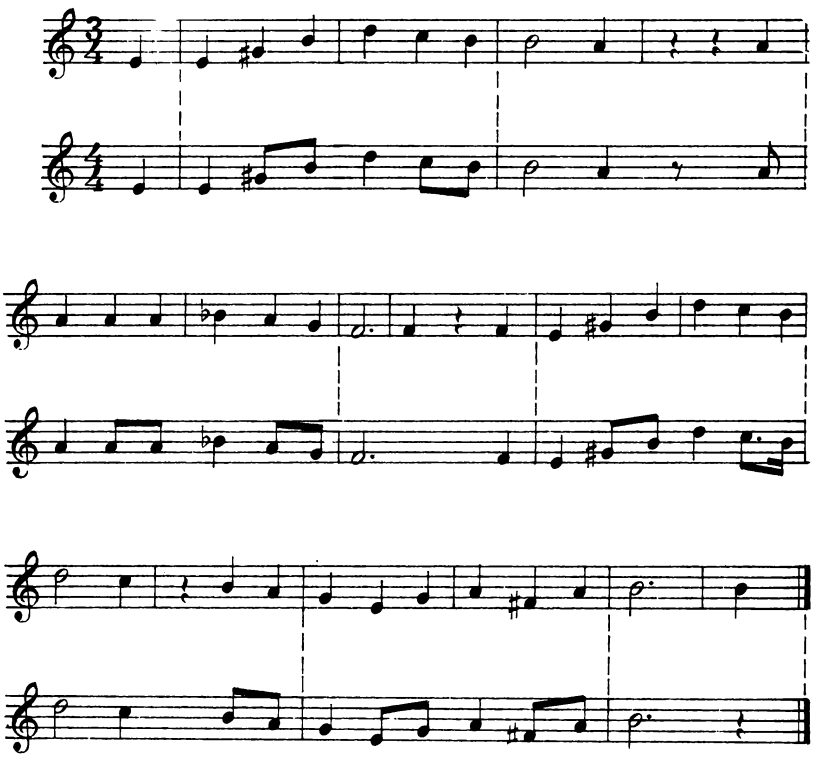


Fig. 3. Valzer e marcia di A. Lepin dal film *Salve Mosca*.

Col tempo 4/4 le quattro note di una battuta vanno suonate con intensità 1-3-2-4 cioè fortissima-debole-forte-debolissima. Col tempo 3/4 l'intensità delle tre note di una battuta è 1-2-3, cioè in ogni caso la prima nota di ogni battuta ha l'accento più forte.

2. Consideriamo ora l'andamento della linea melodica, cioè il succedersi di note più acute e di note più basse, in modo talvolta alternato e talvolta consistente, apparentemente a caso ma in realtà dando luogo a configurazioni che si ripetono in tutto o in parte (v. Fig. 4).

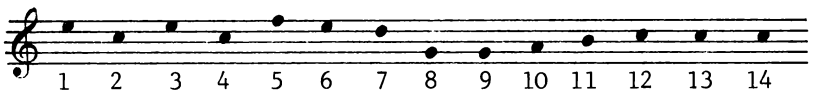


Fig. 4. Linea melodica di *Čižik*.

Un intervallo come quello tra la prima e la seconda nota della Fig. 4, cioè tra mi e do si chiama intervallo di ampiezza $\varphi = 2$ o intervallo di *terza* (contando anche la nota di partenza); quello tra l'ottava e la nona nota, entrambe sol, un intervallo di ampiezza $\varphi = 0$ o intervallo di *prima*; cioè: 0 = *prima*, 1 = *seconda*, 2 = *terza*, 3 = *quarta*, 4 = *quinta*, 5 = *sesta*, 6 = *settima*, 7 = *ottava*, ecc. Dopo l'ampio intervallo tra la settima e l'ottava nota (re-sol) seguono intervalli stretti di *seconda* che riempiono il balzo precedente. Lo stesso fenomeno si incontra all'inizio della canzone di Barlamov (Fig. 5) e in molte melodie.

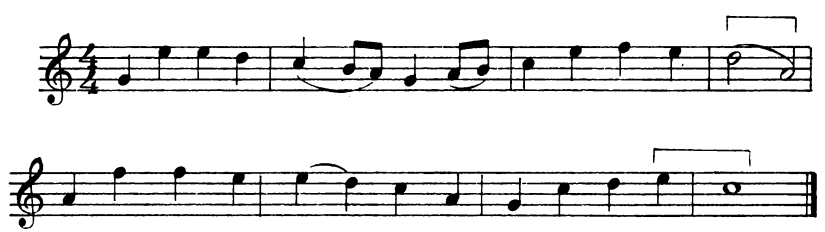


Fig. 5.

Nei due esempi che abbiamo ora visto le note che riempiono il salto si muovono tutte nello stesso verso. Più frequentemente dopo un ampio salto seguono note che, pur alternando i versi di salita e discesa, complessivamente riempiono il salto con intervalli di ampiezza limitata: $\varphi = 0, 1, 2$ (Figg. 6 e 7).

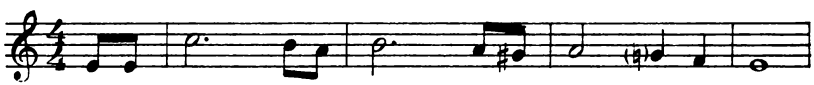


Fig. 6.

Come " salto" si può anche avere una successione di due o anche di tre intervalli piuttosto ampi e nello stesso verso (Figg. 7 e 8).

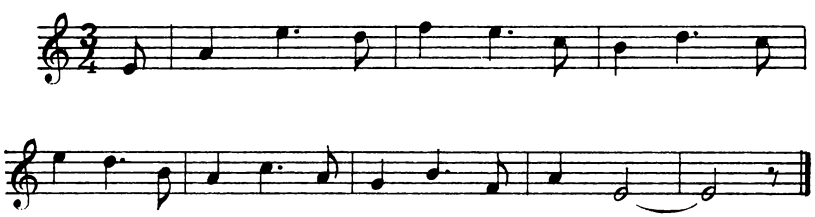


Fig. 7. Esempio di "salto" lentamente riempito.

In altre melodie più complesse si può osservare il seguente interessante fenomeno: nelle battute ove compaiono ampi intervalli il ritmo accetta poche note, mentre nelle battute che contengono molte rapide note gli intervalli tra esse sono meno ampi.

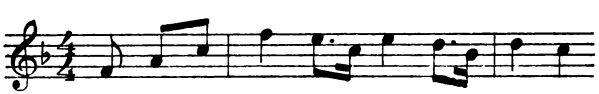


Fig. 8. Esempio di "salto" formato da quattro note successive.

3. Canterellando la canzone *Čižik* avvertiamo chiaramente che la sua struttura generale è suddivisa in due parti, o come si dice, in due proposizioni che occupano ciascuna due battute: scriveremo che la sua struttura generale è del tipo 2 + 2.

Questa possibilità di suddividere la struttura generale appare in ogni opera musicale. Nelle composizioni più complesse la lunghezza di ogni brano melodico di solito si compone di 8 battute che si suddividono in due proposizioni di 4 battute, che a loro volta si possono suddividere in frasi di 2 o di 1 battuta. Così la struttura generale della canzone *Giovanile* risulta del tipo 2+2+1+1+2 (v. Fig. 9 dove le frasi sono indicate con grandi parentesi).

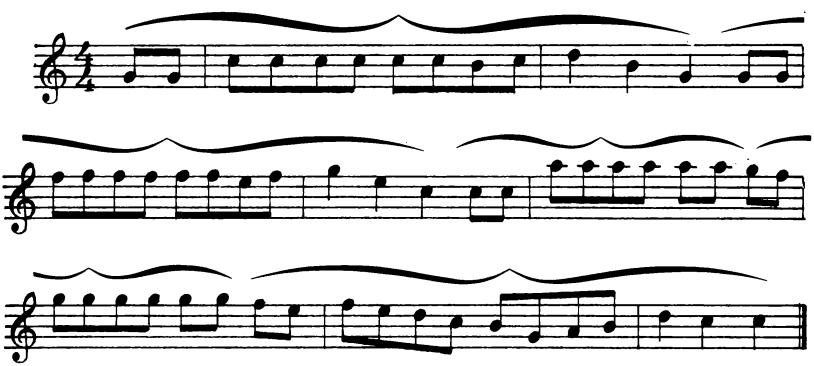


Fig. 9. Decomposizione della canzone *Giovanile* di Dunaevski.

Nella canzone *Čižik* entrambe le frasi iniziano con la prima nota di una battuta (rispettivamente prima e terza battuta) e cioè con una nota forte, accentata; ma non è sempre così in tutte le melodie: spesso la frase inizia con una o due note deboli alla fine di una battuta. Estendendo il significato di un termine usato dagli studiosi di letteratura chiameremo *anacrusi* queste note. Ad esempio nella canzone *Giovanile* (Fig. 9) ognuna delle cinque frasi inizia con una anacrusi composta da due note della durata di 1/8 di battuta ciascuna.

In una stessa melodia le varie frasi possono anche avere anacrusi di varia forma, come nella canzone *La casa sulla Nieva* (Fig. 10) dove la prima e quinta frase non hanno anacrusi.

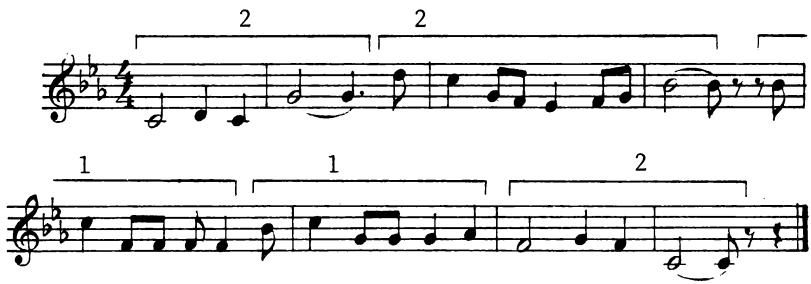


Fig. 10. Melodia con anacrusi varie.

Appare evidente che nella notazione musicale la sbarra verticale non intende delimitare le frasi musicali ma indica soltanto che immediatamente dopo di essa segue la parte più forte, più accentata del tempo.
Nel corso di una battuta se una nota inizia in un tempo debole e trattiene il suo suono in un tempo forte che normalmente ospiterebbe una nuova nota, si dice che il ritmo è *sincopato*. Nella canzone *Passeggiavamo* (Fig. 11) le sincopi sono segnate con asterisco.

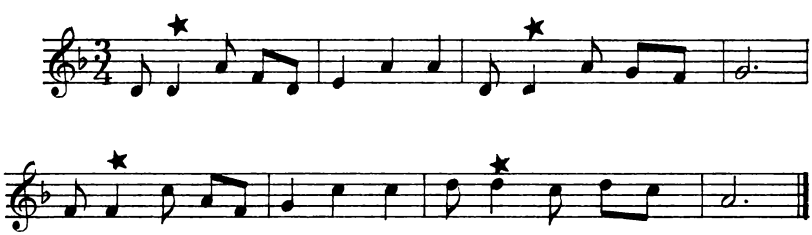


Fig. 11. Esempio di melodia sincopata.

Anche la fine di una frase può essere di vari tipi: nella canzone *Bandiera rossa* (Fig. 12)

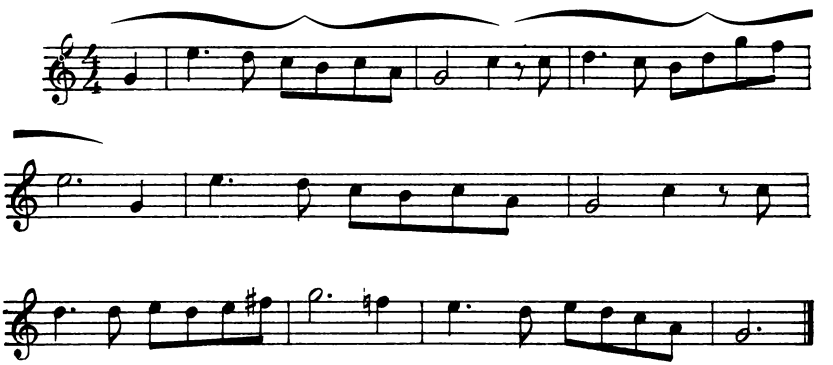


Fig. 12. Esempio di frasi con terminazione maschile e femminile.

la seconda frase termina con una nota all'inizio di una battuta e quindi con forte accento, mentre la prima frase termina con una nota sulla frazione di battuta più debole della nota precedente. Questi due tipi di terminazioni ritmiche si chiamano rispettivamente *maschile* e *femminile* e si indicano con i simboli "∪—" e "—∪".

In ogni caso la fine di una frase musicale è spesso individuata da una nota di lunga durata, come in entrambe le frasi di *Čižik*. Oltre a ciò l'individuazione delle frasi è anche facilitata dalle similitudini che le varie frasi hanno spesso tra loro. Ad esempio in *Čižik* nelle due frasi si ripete esattamente lo stesso ritmo (ma non lo stesso andamento melodico). Nella canzone della Fig. 12 la terza frase è esattamente la ripetizione della prima. In altre melodie si possono incontrare frasi sotto qualche aspetto modificate, ad esempio spostate di alcuni gradini sulla scala. Una tale *traslazione* intercorre ad esempio tra la prima e la seconda frase della Fig. 9 (e anche tra la quinta e la sesta battuta).

Una modificazione più profonda è la *variazione* di una melodia, che verrà studiata nella sezione 2.3. Qui ci limitiamo a portare l'esempio della Fig. 13.

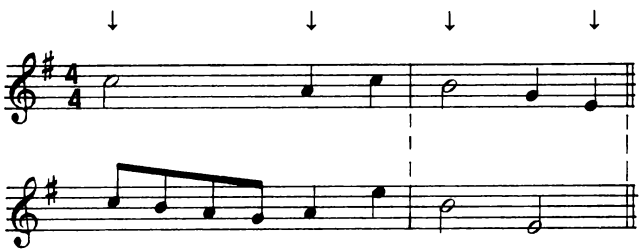


Fig. 13. Esempio di variazione.

In ogni melodia si incontrano sempre frasi in qualche modo tra loro simili: o nel ritmo o nell'andamento melodico. La ragione fondamentale sta nel fatto che la nostra mente percepisce e apprezza il nuovo solo in contrapposizione col vecchio, e dunque ha bisogno di una periodica ripetizione del vecchio o meglio ancora del "nuovo simile al vecchio" per essere aiutata a ricordare il vecchio.

4. Passiamo ora all'esame del ruolo delle varie note rispetto all'armonia fondamentale.

Se suoniamo la canzone *Čižik* sul pianoforte arrestandoci a metà della melodia avvertiamo subito che l'ultima nota suonata, il re, ha un senso incompiuto, instabile, e provoca il desiderio di "risolvere" verso il do. Anche terminando con un fa o con un si, si avrebbe la stessa impressione, ancora più forte.

L'insieme delle note di una melodia, differenziate dal punto di vista della loro maggiore o minore stabilità, si chiama *scala di una tonalità*. Se ad esempio una melodia può essere suonata sui tasti bianchi del pianoforte e la nota più stabile è il do, allora i tasti bianchi costituiscono la *scala di do maggiore*, se invece una melodia può essere suonata sui tasti bianchi e la nota più stabile è il la, allora essi costituiscono la *scala di la minore*. Usando alcuni tasti neri invece di alcuni bianchi queste due scale possono essere traslate in una qualunque altra *tonalità*. Oltre alle scale maggiore e minore esistono parecchie altre scale, come ad esempio quella *pentatonica* che può essere approssimata usando i soli tasti neri del pianoforte, sulla quale è basata la musica dei tartari, cinesi, giapponesi, e di altri popoli.

L'esigenza di una *tonalità*, cioè l'esigenza di una nota più stabile delle altre e di una scala di altre note ad essa collegate in vario modo, è una esigenza naturale: è il nostro modo di *sintonizzare* i rumori non musicali trasformandoli in musica.

Accanto alla musica tonale, che è alla base delle composizioni sovietiche, nel mondo occidentale si è diffuso nel XX secolo una musica atonale e in particolare quella *dodecafonica* del compositore austriaco A. Schönberg (1874-1951). In essa tutte le 12 note della scala hanno uguale ruolo senza differenza di toni stabili e instabili. Le regole di composizione hanno strutture molto chiare (v. ad es. [107, 114]).

Tuttavia, oltre alle regole di composizione che stabiliscono i passaggi leciti tra nota e nota, non bisogna dimenticare la logica generale di una composizione, la sola cosa che può dare un senso all'opera musicale. In altre parole, come è confermato dalla storia della musica, nell'ambito di qualsiasi stile o insieme di regole di composizione possono essere composte musiche ricche di contenuto e musiche di scarso valore.

5. Le quattro analisi di un'opera musicale illustrate precedentemente possono essere collegate, come vogliamo ora indicare.

Ad esempio collegando l'analisi del ritmo con l'analisi della linea melodica possiamo distinguere due tipi di "salti" come quelli all'inizio delle melodie nelle figure 5 e 12. Entrambi vanno da sol a mi e sono seguiti pressapoco dallo stesso riempimento, ma mentre il primo va da una nota lunga e fortemente *accentata* verso una nota *debole* producendo un effetto di ampiezza melodiosa, il secondo salto invece va da una nota *debole* (anacrusi) e corta verso una nota lunga e *forte* con un carattere vigoroso che si incontra spesso nelle marce.

In una melodia c'è spesso un punto "culminante" che viene segnalato da tutte e quattro le analisi. Esso si trova un po' oltre la metà, in corrispondenza della cosiddetta *sezione aurea* che è la media geometrica a tra l'intero intervallo di tempo $a + b$ e la parte restante b (v. Fig. 14).

In formule $(a + b)/a = a/b$, che per $a + b = 1$ fornisce $a = 0{,}62$ circa. In una melodia di otto battute questo punto corrisponde alla quinta battuta e all'inizio della sesta. Dal punto di vista del ritmo la culminazione si traduce di solito nella maggior lunghezza della durata di una nota; dal punto di vista della linea melodica la culminazione è di solito indicata dalla nota più acuta; anche dal punto di vista della struttura generale la culminazione è un punto critico; infine

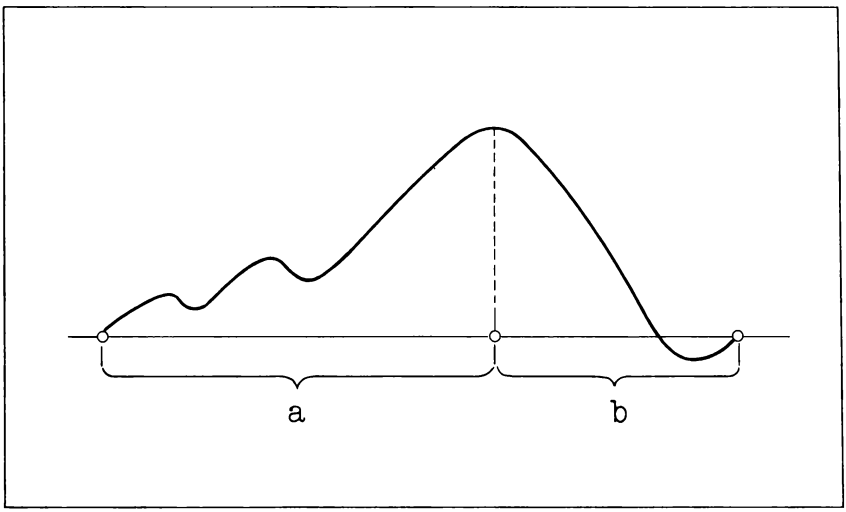


Fig. 14. Linea melodica e sua culminazione nel punto della sezione aurea.

dal punto di vista del ruolo delle note rispetto all'armonia fondamentale nel punto di culminazione si fa spesso uso di note molto instabili (sesto o settimo grado della scala) o addirittura di note di passaggio fuori scala. Il punto culminante si può ad esempio facilmente individuare nella melodia della Fig. 9.

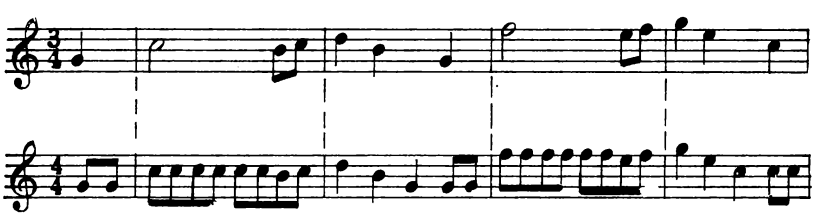
6. Ancora un collegamento tra diversi tipi di analisi: come si è detto la prima frase della canzone *Čižik* (Fig. 1) termina con una nota poco stabile come il re e ha quindi un senso incompiuto di "domanda" la cui "risposta" è fornita dalla seconda frase che termina con la nota stabile do. Osserviamo ora che a questo dialogo tra domanda e risposta contribuisce anche l'andamento della linea melodica: il movimento delle note alla fine della domanda va dall'alto al basso, mentre alla fine della risposta va dal basso verso l'alto. Analogamente nella melodia della Fig. 10 la "domanda" (prima e seconda frase) termina con moto ascendente mentre la "risposta" termina con moto discendente.

Spesso la "domanda" ha una terminazione del tipo che abbiamo chiamato "femminile", mentre la "risposta" ha una terminazione "maschile" (v. Fig. 5 dove queste due diverse terminazioni sono indicate dalle parentesi sovrapposte alle note).

7. Non bisogna, evidentemente, ritenere che le regole o caratteristiche che abbiamo descritto debbano essere sempre tutte rispettate in una melodia. I diversi stili si ottengono associando in un modo o nell'altro alcune di queste caratteristiche, e cioè ciò che caratterizza alcune melodie è proprio la violazione di alcune norme. Lo stesso discorso si applica alle innumerevoli altre regole più complesse di quelle che abbiamo finora descritto.
Regole molto più complesse si possono individuare esaminando melodie con strutture più complesse di quelle finora considerate. Una struttura molto diffusa è ad esempio quella delle composizioni divise in tre parti, di cui la parte centrale è la più ricca di energia e contrasti, come nella canzone *Poloneze* di Oginskij.

2.3 *Variazione di una melodia*

Al punto 3 del paragrafo 2.2 sono state considerate alcune ripetizioni di "frasi" musicali con alcune modifiche nel ritmo o nella melodia. Il fenomeno della variazione si manifesta, in una composizione, anche su più vaste proporzioni, e anche tra composizioni diverse.
La conservazione di un solo elemento, ad es. melodico, mentre gli altri elementi vengono mutati può dar luogo a musiche con caratteri così diversi che difficilmente si riconoscono simili, come avviene ad esempio nelle due canzoni: *Passeggia sul Don il giovane cosacco* e *Giovanile* di Dunaevskij (v. Fig. 15).



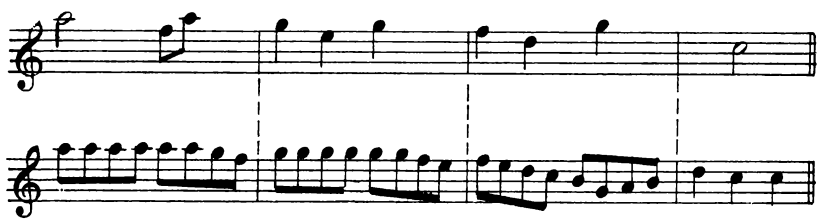


Fig. 15. Esempio di una stessa melodia con ritmi diversi.

Un po' variata rispetto a queste due canzoni è quella nella Fig. 16 che pur conserva gli elementi essenziali facilmente riconoscibili.

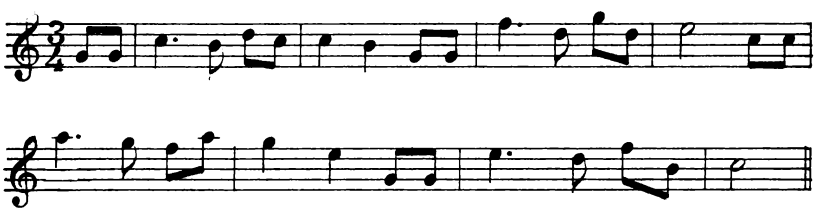


Fig. 16. Una melodia simile a quelle precedenti.

Più in generale ogni elemento di una composizione può essere variato: il tempo, il ritmo, parte della linea melodica, la scala e la tonalità.
Per quanto riguarda questi ultimi elementi consideriamo ad esempio le *Variazioni del tema Rococo* di Čiajkovskij (Fig. 17) dove nonostante i molti elementi variati rimane la sensazione del tema originale.
Nella Fig. 17, per facilitare il confronto tra tema e variazione, quest'ultima è stata trasportata in una tonalità diversa da quella scelta da Čiajkovskij. I ritmi coincidono; le linee melodiche coincidono in parecchie note che però hanno un ruolo diverso (nelle diverse tonalità). Ciò che viene pienamente conservato della linea melodica non è l'ampiezza di ogni intervallo tra due note consecutive ma il "segno" di ogni intervallo: in salita verso una nota più acuta o in

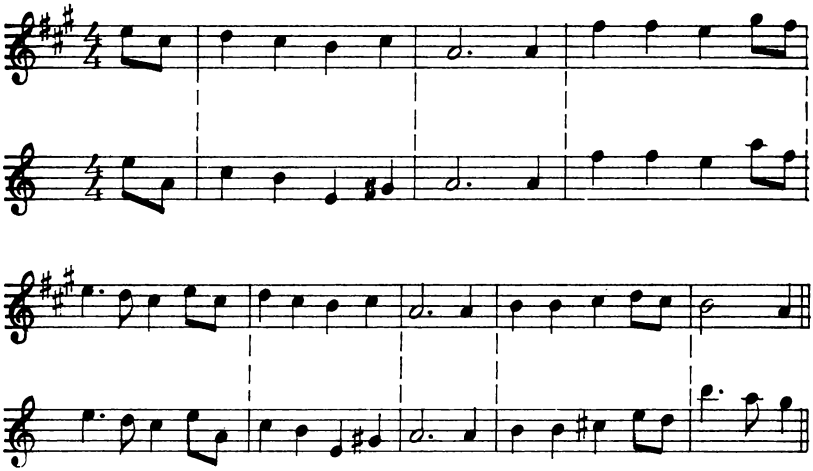
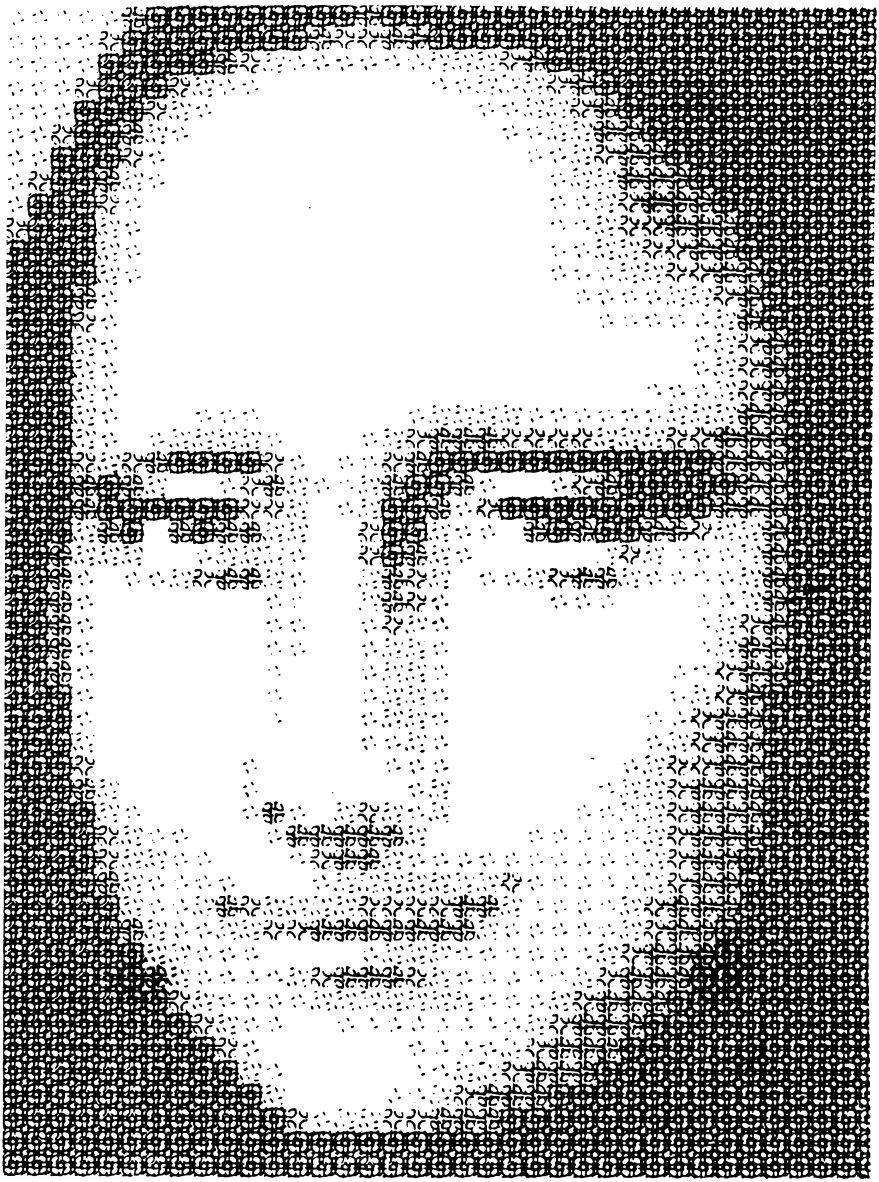


Fig. 17. Temi e Variazioni (Čiajkovskij).

discesa verso una nota più bassa, e naturalmente questa conservazione dei "segni" della linea melodica contribuisce a conservare la sensazione del tema.



The smile of computer art

3

Sui mezzi meccanici di composizione musicale

Da quando si è cominciato a scrivere la musica rappresentandola con simboli musicali sono cominciati ad apparire ogni tanto alcuni mezzi abbastanza originali per "comporre" qualche cosa che si scriveva sotto forma di note su carta musicale, ma che non suscitava alcun entusiasmo presso gli ascoltatori.
Tra questi strani mezzi, poco musicali, ricordiamo lo spazzolino da denti, il mazzo di carte, i dadi, e molti altri oggetti. Annoveriamo anche il metodo . . . del plagio di musica vera.
Uno dei primi metodi di composizione della musica con mezzi poco musicali è quello proposto nel 1751 dal musicista inglese William Hays nel suo opuscolo umoristico *Un nuovo metodo per comporre musica utile ai talenti decaduti.* Si trattava di intingere nel calamaio uno spazzolino da denti e di passare un dito sulla setola facendo spruzzare l'inchiostro sulle pagine musicali. Dopo di che non rimaneva che arrotondare le note, aggiungere le sbarre, tenendo conto del ritmo suggerito dal caso con un mazzo di carte. Dopo questi tormenti della creazione si ottenevano "composizioni" pronte per l'esecuzione come quella nella Fig. 18.

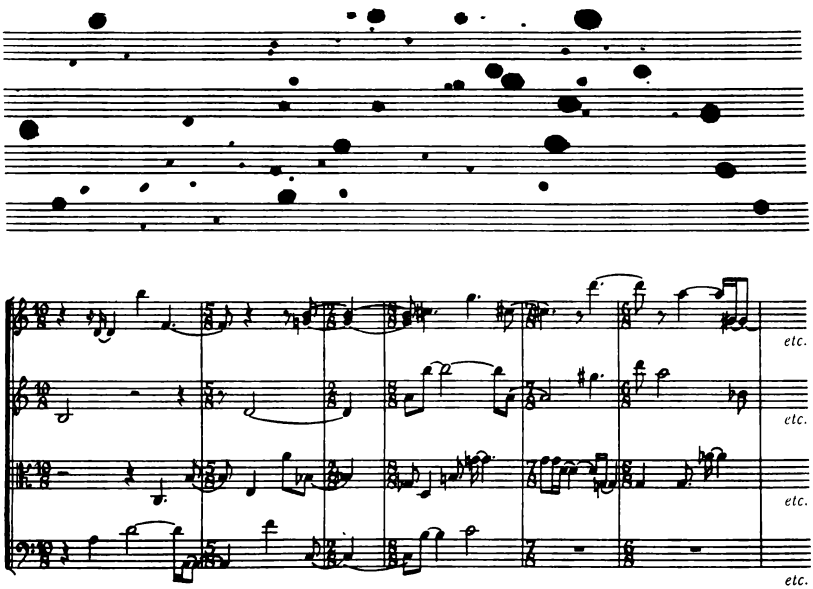


Fig. 18. "Composizione" casuale.

Si potrebbero citare moltissimi altri "mezzi di composizione non musicali"; nonostante la loro varietà i procedimenti escogitati avevano tutti un solo punto in comune nell'opinione degli ascoltatori, e questo punto non era quello chiamato musica.

Nonostante la mancanza di buoni risultati e nonostante l'inadeguatezza di questi procedimenti di fronte alla musica, che è espressione del pensiero, l'interesse per queste ricerche non venne a mancare.

Man mano che col passare dei secoli gli stili musicali si modificavano, le nuove caratteristiche che in questi stili si delineavano più evidenti venivano prese come base di metodi di composizione automatica.

Nel XVIII secolo anche tra compositori come Bach, Haydn, Händel si era diffuso il divertimento di comporre musica con l'aiuto dei dadi. Così nel 1757

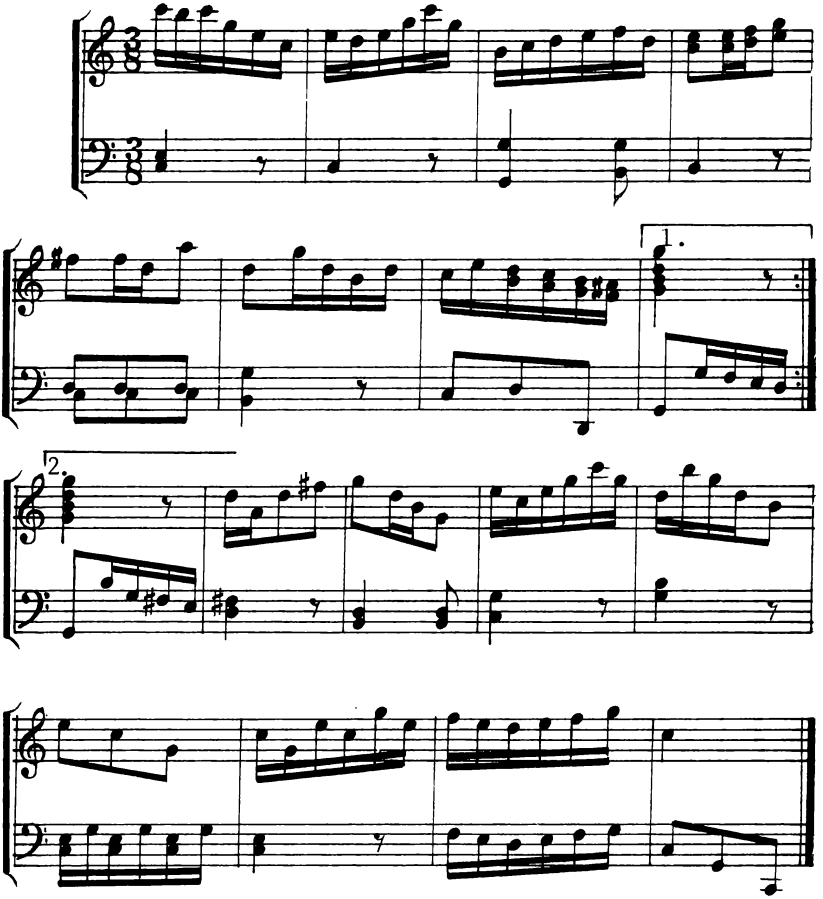


Fig. 19. Valzer composto con l'aiuto dei dadi.

Kirnberger pubblicò la *Guida alla composizione delle polonesi e dei minuetti con l'aiuto dei dadi.* Altre pubblicazioni di questo tipo erano legate al nome di Mozart (il quale si dilettava con simili rompicapi intellettuali) come ad esempio il manuale il cui frontespizio è riportato nella Fig. 20.

Fig. 20. Frontespizio del manuale per comporre musica con i dadi secondo il metodo attribuito a Mozart.

Questo manuale conteneva una tabella a otto linee (corrispondenti alle otto battute della composizione) e sei colonne (corrispondenti alle facce di un dado). In ogni quadretto di questa tabella si trovava una combinazione di note che occupava il tempo di una battuta. Le otto battute si ottenevano gettando il dado otto volte e scegliendo le note scritte nel quadretto corrispondente al numero indicato dal dado e alla battuta in costruzione. Il numero delle possibili composizioni di otto battute è ovviamente

$$6^8 = 1.679.616$$

La maggiore difficoltà era ovviamente quella di preparare la tabella in modo tale che ogni combinazione di note scritta in un quadretto di una linea potesse

gradevolmente proseguire con una qualsiasi combinazione di note scritta in un quadretto della linea successiva, senza contraddire le più elementari norme di sviluppo melodico.

È chiaro che, anche potendo far uso in moltissimi modi di questi frammenti di composizione preparati in anticipo, la libertà dell'opera è molto limitata e mai avremmo avuto la melodia di una canzone come quella dell'*Internazionale.*

Alcuni altri metodi "meccanici" di composizione sono descritti in [46, 97, 112].

4

Rassegna di ricerche sulle applicazioni dei calcolatori elettronici alla musica

L'avvento delle macchine elettroniche ha potenziato i metodi di composizione musicale con mezzi non musicali. Secondo quanto riferito in [97] il metodo "Mozart" descritto nel capitolo precedente è stato tradotto in un programma eseguibile da una macchina elettronica. In altre ricerche invece di basare la composizione essenzialmente sul caso si è iniziato a tenere conto di alcune regole o caratteristiche di composizione, studiando soprattutto il legame statistico tra note che figurano vicine nella melodia. Altri metodi infine sono stati basati su regole e caratteristiche più complesse.

Composta la musica, la macchina elettronica può facilmente stampare le note o sotto forma di numeri o in modo simile alla scrittura tradizionale della musica, oppure può anche, come è stato subito osservato, sintetizzare i suoni imitando i timbri di un qualsiasi strumento musicale.

Più tardi, con l'aiuto delle macchine elettroniche si è incominciato ad effettuare una analisi delle composizioni musicali per scoprire caratteristiche più complesse di quelle osservabili con una superficiale statistica, e per creare linguaggi algoritmici musicali che possano facilitare queste ricerche.

In questo capitolo viene presentata una rassegna di tutti questi studi, iniziati negli anni '50, suddivisi nelle tre seguenti categorie:

1. Composizione di musica mediante macchine elettroniche: [1, 10, 11, 12, 13, 24, 25, 36, 44, 45-48, 64, 65, 86, 91, 92, 93, 96, 106, 109, 115, 119, 125, 126-135, 137, 138];
2. Analisi della musica con linguaggi matematici: [15, 16, 27, 28, 29, 34, 54-58, 134-135];
3. Esecuzione di musica mediante macchine: [14, 43, 49, 50, 53, 67, 68, 70, 72-74, 91, 92, 119, 123, 124, 141].

Per ciascuna di queste tre categorie i risultati verranno esposti seguendo l'ordine cronologico.

4.1 *Composizione mediante macchine elettroniche*

Possiamo distinguere due modi diversi di procedere, che esporremo rispettivamente nei punti 1-2, 3-4 di questo paragrafo.

1. Un primo metodo di composizione automatica è quello basato sulla correlazione delle note che si susseguono in ogni breve tratto di melodia. Come breve tratto locale di melodia si prende un piccolo numero di note successive: di solito meno di 10, e cioè si suppone che ogni nuova nota dipenda soltanto dalle ultime 9 note suonate e sostanzialmente non dipenda dalle precedenti [37].

Descriviamo a grandi linee questo metodo. È ben nota la teoria matematica dei processi di Markov [71] (1856-1922) e cioè di quelle successioni di eventi che ad ogni passo seguono una legge casuale nella quale la probabilità di ciascun possibile nuovo evento dipende dall'ultimo evento che si è verificato precedentemente (e in tal caso si parla di una catena di Markov di ordine 2) o, più in generale, dagli ultimi $n-1$ eventi verificati (e in tal caso si parla di una catena di Markov di ordine n). L'ordine n di un processo di Markov è il numero di eventi successivi che influenzano la probabilità di scelta dell'ultimo di essi.

Questa teoria può essere applicata compiendo anzitutto una statistica su un certo numero di melodie, e precisamente analizzando tutti i tratti di n succes-

sive note e conteggiandone tutte le frequenze. (Questa analisi può essere fatta sia per quanto riguarda l'altezza delle note: do, re, ecc. sia per quanto riguarda la loro durata: 1/4, 2/4, ecc.)
Costruita questa grande tabella di frequenze la composizione automatica procede nel seguente modo: considerando le ultime n-1 note composte (inizialmente assegnate) si cercano nella tabella tutte le successioni di n note che iniziano con queste n-1 e per ciascuna possibile n-esima nota si raccoglie la corrispondente frequenza. Tenendo conto di queste frequenze da usare come probabilità si sceglie la nuova nota con un procedimento casuale che rispetta queste probabilità. E così si prosegue.
Facciamo un esempio con $n = 4$. Supponiamo di aver già composto o di iniziare con le tre note

do, re, fa

e supponiamo che l'analisi delle melodie raccolte inizialmente abbia dato luogo ad una grande tabella di quaterne di note tra le quali quelle che iniziano con do - re - fa sono le seguenti:

do - re - fa - sol
do - re - fa - sol
do - re - fa - mi
do - re - fa - mi
do - re - fa - mi
do - re - fa - mi
do - re - fa - mi
do - re - fa - la
do - re - fa - re
do - re - fa - re

Ne segue che le frequenze delle note che seguono do - re - fa sono:

sol = 0,2; mi = 0,5; la = 0,1; re = 0,2.

Per scegliere la quarta nota rispettando queste probabilità (rappresentate con

le lunghezze dei segmenti nella Fig. 21) basta estrarre a caso un numero x compreso nell'intervallo $0 \leqslant x < 1$ e scegliere la nota:

sol	se risulta	$0 \leqslant x < 0{,}2$
mi	se risulta	$0{,}2 \leqslant x < 0{,}7$
la	se risulta	$0{,}7 \leqslant x < 0{,}8$
re	se risulta	$0{,}8 \leqslant x < 1$

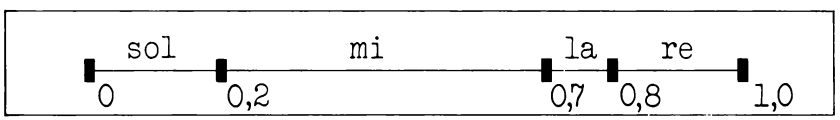


Fig. 21. Ripartizione delle frequenze delle note successive a do - re - fa.

Così per esempio se il numero x estratto a caso, è $x = 0{,}75$ allora si sceglie la nota la, sviluppando così la composizione:

do - re - fa - la

e dopo di ciò il procedimento si ripete a partire dalle ultime 3 note composte:

re - fa - la.

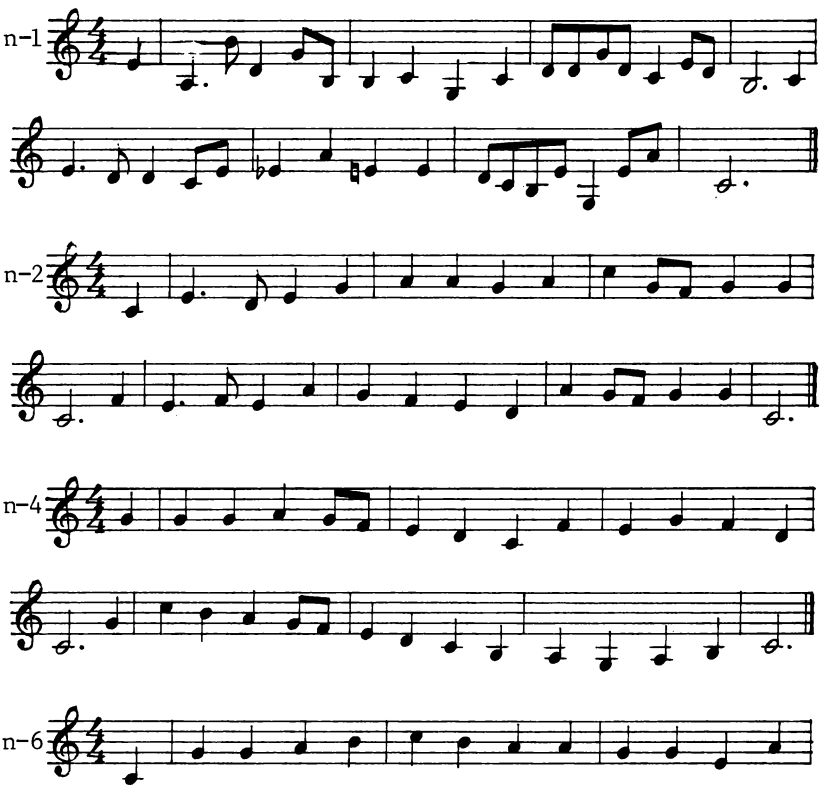
Il procedimento è analogo per un qualsiasi valore del numero n (che in questo esempio era $= 4$).

2. Descriviamo ora gli esperimenti fatti con questo metodo.

Prima ancora dell'avvento dei calcolatori elettronici questi calcoli venivano fatti a mano, ma sarebbe stato faticoso superare il valore $n = 2$. Segnaliamo i lavori di Pinkerton [96] e di Altnivov (in [101]), e la realizzazione del processo di Markov con macchine elettroniche compiuta da Brooks, Hopkins, Neumann, Wright [10, 86].

Questi autori hanno introdotto nella memoria della macchina 37 canzoni, di uguale struttura metrica, composte da diversi compositori in periodi diversi. Le canzoni sono state analizzate come processi di Markov di vario ordine ($n = 1$,

2, . . . , 8). Per la composizione veniva anzitutto fissato lo schema ritmico. Come c'era da aspettarsi, per piccoli valori di n ($\leqslant 2$) le melodie costruite suonano forzate e difficilissime da cantare. D'altra parte per valori di n più grandi, a causa del piccolo volume di melodie introdotte nella macchina, le melodie costruite risultavano troppo somiglianti a quelle introdotte nella macchina. Ad esempio per $n = 8$ come si vede nella Fig. 22 la melodia coincide a tratti con tre diverse canzoni iniziali, e i posti di passaggio dall'una all'altra (dove due canzoni avevano una medesima successione di 7 note) sono indicati in basso da parentesi.



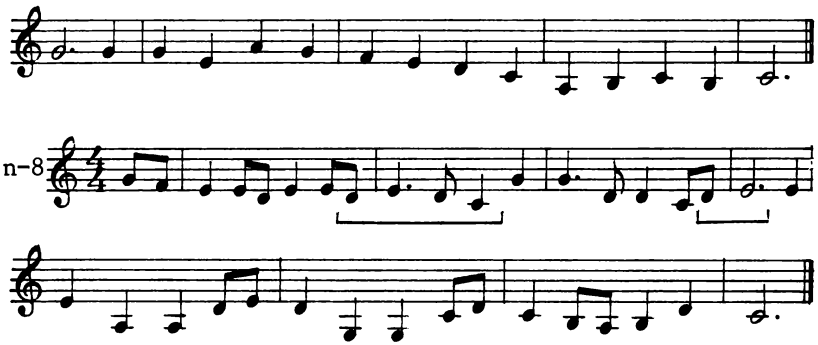


Fig. 22. Alcune canzoni introdotte nella macchina e melodia composta automaticamente negli esperimenti riferiti in [10].

Lo stesso principio è alla base degli esperimenti di Olson e Belar [92]. All'inizio è stata compiuta una analisi statistica di 11 canzoni del compositore americano Stephen Foster (1826-1864), trasposte in una stessa tonalità, conside-

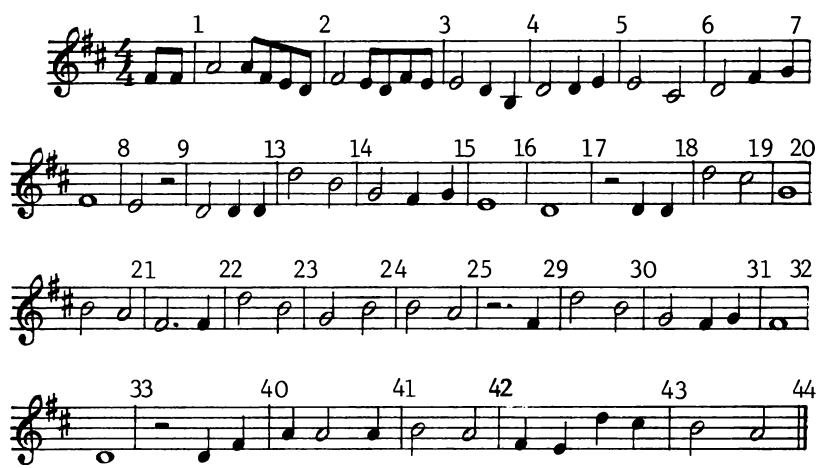


Fig. 23. Trentadue battute selezionate tra quelle composte negli esperimenti di Olson e Belar [92].

rando sia il nome delle note sia la loro durata. Come "ordine" del processo di Markov è stato scelto $n = 3$. Le melodie costruite dalla macchina sono state eseguite per mezzo di sintetizzatori. Dopo aver ascoltato molte battute, si sono scelte le più gradevoli per ritmo e per linea melodica (v. Fig. 23).

Gli autori affermano che le melodie costruite hanno uno stile simile a quello di Foster, e ritengono che partendo da canzoni di un qualsiasi compositore si potrebbero ottenere melodie che ne conservano lo stile. È però molto dubbio che un tale risultato si possa effettivamente ottenere col procedimento seguito, cioè analizzando la melodia come se fosse un processo di Markov. L'esperimento che consiste nel prendere canzoni di due compositori: A e B, e di vedere se le melodie costruite dalla macchina a partire dalle canzoni di A e quelle costruite a partire dalle canzoni di B effettivamente riflettono gli stili rispettivamente di A e di B, *non* è stato compiuto.

Criticando il procedimento markoviano, Barbour [5] osserva che le melodie costruite hanno un carattere che non sembra basato sul principio seguito per generarle, e osserva anche che il ritmo caratteristico delle canzoni di Foster viene perduto, come anche le strutture generali e gli sviluppi armonici, cioè tutte le caratteristiche essenziali.

Le obiettive esigenze della nostra percezione acustica danno un grande valore alle strutture generali come la decomposizione dell'opera musicale in frasi, la ripetizione o variazione di temi e di ritmi, le parziali similitudini tra diversi sviluppi, ecc. Tutte queste caratteristiche essenziali, anche in piccole melodie di 8 o 16 battute composte da una cinquantina di note, non possono essere raggiunte (quando si considerano soltanto tratti locali di n note successive) se non per valori di n molto più grandi di 10. D'altra parte appena il valore di n cresce, subito purtroppo crescerebbe rapidamente il volume di memoria della macchina necessario per ospitare l'enorme tabella delle frequenze di tutti i possibili tratti di n note, crescerebbe anche il tempo della macchina necessario per usare questa tabella, e infine crescerebbe anche il numero delle melodie da analizzare inizialmente per costruire una efficiente tabella di frequenze che non faccia semplicemente produrre melodie coincidenti a tratti con qualcuna di quelle analizzate, come si è già osservato.

I lavori più recenti, [25, 44, 64] ed altri, ripetono in sostanza la stessa situazione cambiando soltanto il materiale per l'analisi markoviana, e senza intro-

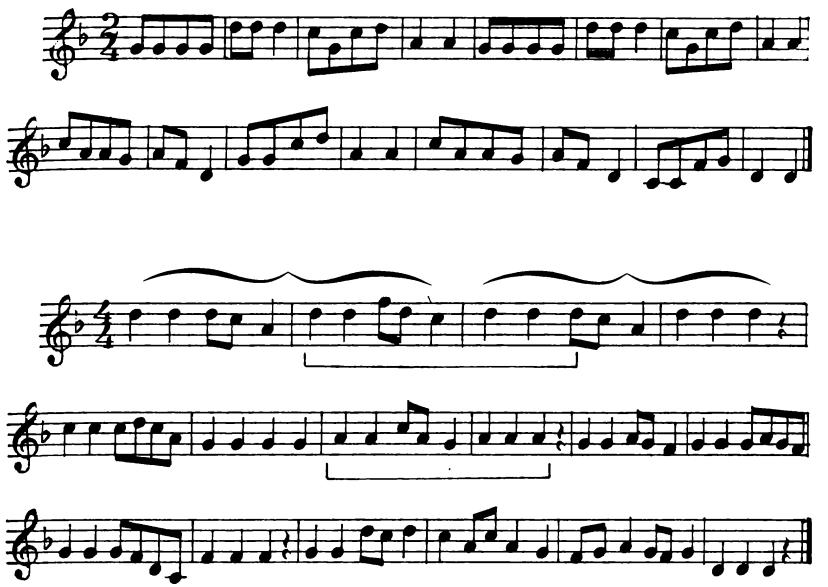


Fig. 24. Due melodie di Kodaly.

durre alcun sostanziale sviluppo del metodo.

Ad esempio nel lavoro di Havass [44], dedicato allo studio della musica popolare ungherese a cinque toni, sono state anzitutto raccolte alcune melodie di Kodaly come quelle in Fig. 24.

In queste melodie appaiono evidenti alcune ripetizioni (come quella indicata con le parentesi sopra le note), talvolta con traslazione di tono (come quella indicata con le parentesi sotto alle note). Questa caratteristica non è presente nelle melodie generate dalla macchina in base all'analisi di Markov (Fig. 25). La stessa cosa si osserva nel lavoro di Kupper [64], dove è stata compiuta una analisi di Markov con ordine $n = 4$ sull'*Invenzione a due voci in do maggiore* di Bach, di cui alcune battute sono riportate nella Fig. 26 con alcune parentesi per indicare le frasi ripetute (eventualmente traslate di tono, come nella prima e nella seconda battuta con una traslazione di una quinta).

L'organizzazione di queste ripetizioni, che certamente non è casuale in Bach, manca del tutto nella melodia composta automaticamente (v. Fig. 27) che l'autore dell'articolo ha chiamato *Computer-Play-Bach.*

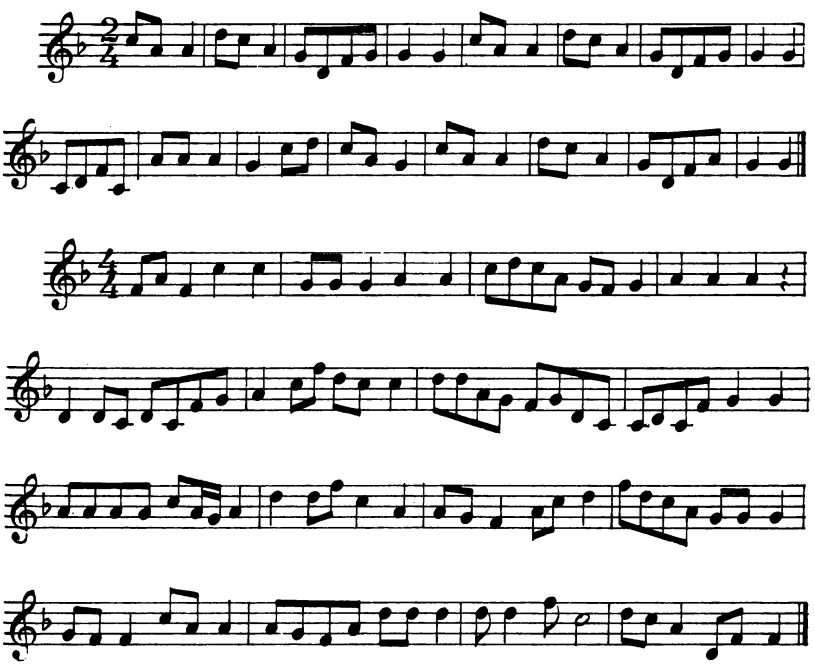
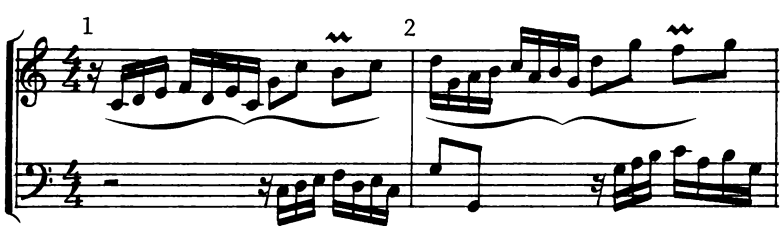


Fig. 25. Due melodie composte automaticamente negli esperimenti di Havass [44].



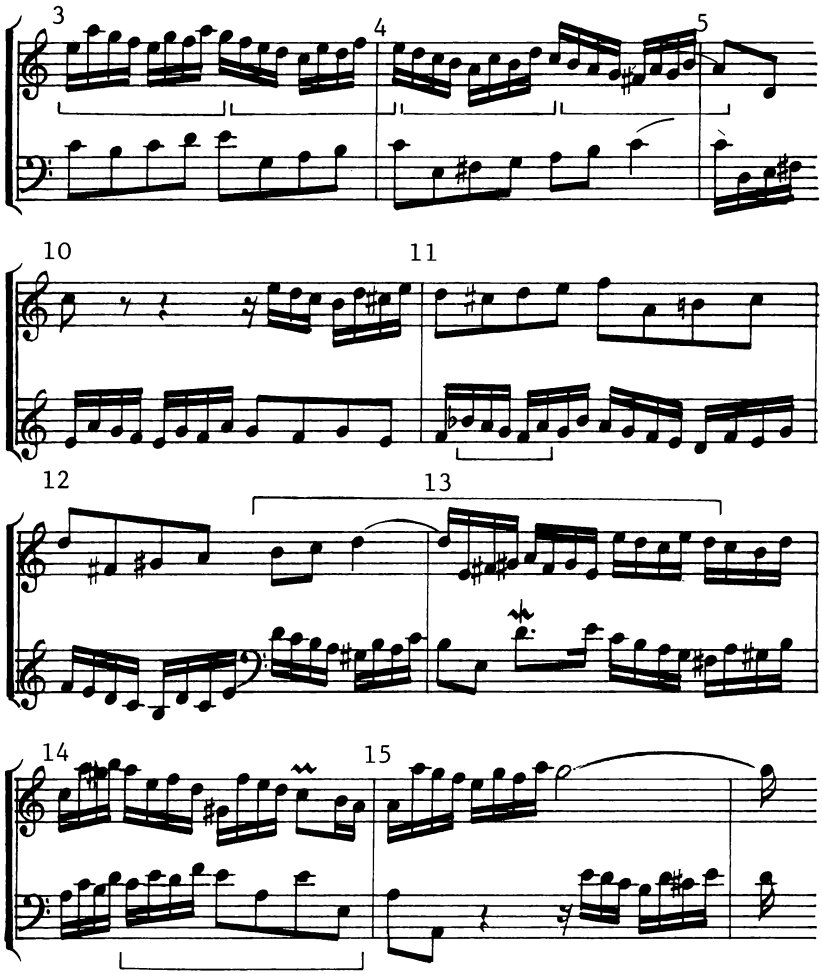


Fig. 26. Due brani di Bach.

Questa melodia in alcuni tratti ricopia successioni di note che si trovavano nella musica introdotta nella macchina: nella Fig. 27 questi tratti sono indicati da parentesi con il numero delle battute della musica in Fig. 26 dalle quali provengono; ad esempio dalle battute 12 e 13 è stata ricopiata una successione di 15 note. Ciononostante le strutture generali mancano del tutto.
Una situazione analoga si verifica negli studi linguistici. Con particolare riferimento alla lingua inglese N. Chomsky è giunto alla conclusione che la teoria dei processi di Markov non può servire per costruire un modello automatico della grammatica inglese, nemmeno aumentando l'ordine n.

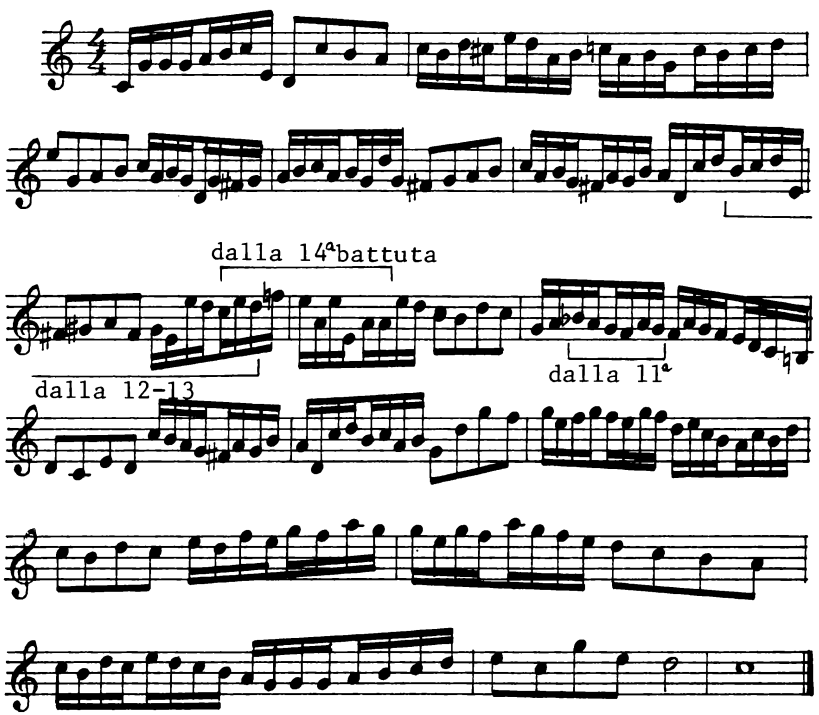


Fig. 27. Melodia composta automaticamente negli esperimenti di Kupper [64].

Ritornando al problema della composizione automatica della musica rimane vero che l'analisi markoviana può servire per la composizione di singole battute, (da organizzare tra loro con altri procedimenti che descriveremo in seguito), a tale scopo però l'analisi markoviana deve esaminare molti aspetti della melodia, come ad esempio il ruolo delle varie note rispetto all'armonia.

3. Il secondo metodo di composizione automatica, anziché sulla correlazione statistica tra note vicine, è basato sulle norme che i musicisti hanno scoperto studiando le opere musicali, norme che si è tentato di tradurre in relazioni logiche tra gli elementi della composizione, e quindi in regole programmate per macchine elettroniche. Vari tipi di composizione sono stati tentati con questi procedimenti, dal contrappunto in poi, ottenendo in particolare musica dodecafonica.

4. In questo ordine di idee si possono inquadrare gli esperimenti di Klein e Bolitho (in [115]), v. Fig. 28.

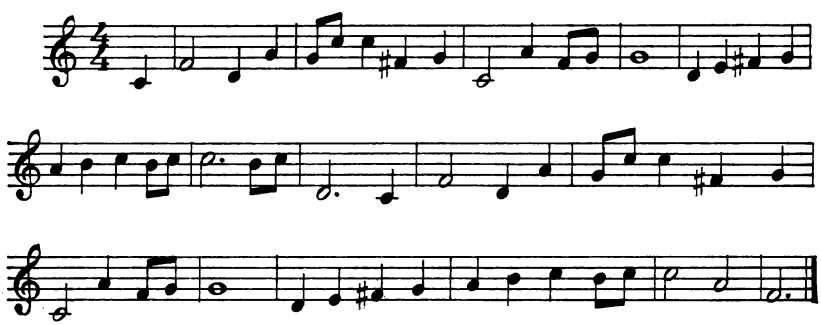


Fig. 28. Melodie composte negli esperimenti di Klein e Bolitho [115].

Il direttore del laboratorio di musica elettronica dell'Università dell'Illinois, Hiller, e il matematico Isaacson programmarono sulla macchina ILLIAC una suite per quartetto d'archi, [45, 46, 47]. Sono stati fatti quattro esperimenti: nei primi due sono state elaborate semplici melodie coi soli tasti bianchi del pianoforte. La successione delle note è stata ottenuta con un processo casuale che

rispetta alcune regole del secolo XVI; la prima ed ultima nota dovevano coincidere col "do centrale", e gli intervalli di 6 semitoni o di 11 o di più di 12 erano proibiti. Nelle composizioni a più voci venivano imposte alcune regole di contrappunto come il divieto di quinte e ottave parallele (v. Fig. 29).

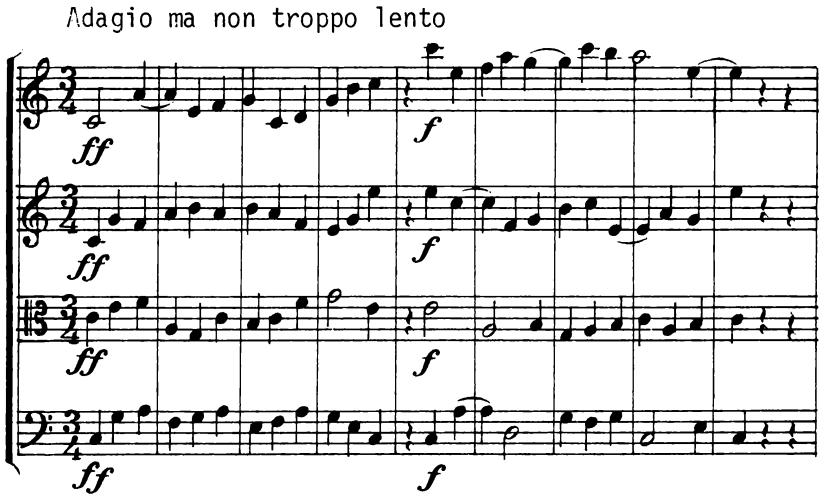


Fig. 29. Alcuni brani composti negli esperimenti di Hiller e Isaacson [45-47].

Nel terzo esperimento degli stessi autori si è fatto uso di tutte le 12 note, lasciando inizialmente libera la macchina di produrre musica del tutto casuale (con forti dissonanze) e introducendo poi regole tradizionali per selezionare le battute. Secondo l'opinione degli autori la musica ottenuta ricorda le composizioni *atonali* degli autori moderni, come si può giudicare dal brano riportato nella Fig. 30.

Nell'ultimo esperimento degli stessi autori le regole tradizionali di composizione sono state sostituite con regole matematiche di una certa complessità e volutamente prive di significato musicale. Come gli stessi autori hanno osservato la musica ottenuta (v. Fig. 31) è molto simile a quella ottenuta nell'esperi-

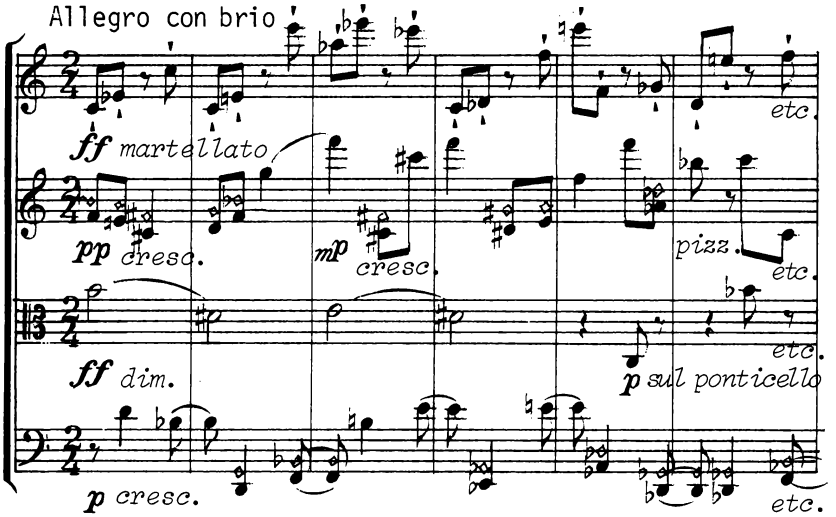


Fig. 30. Un brano della 3ª parte della suite ottenuta da Hiller e Isaacson.

mento precedente.

Nel 1959 furono ottenute dall'autore di questo libro con la macchina URAL alcuni brani ad una voce [126-128]. La struttura generale della composizione era del tipo *ABA* e più precisamente consisteva in 5 *periodi* di 8 battute (in do maggiore col tempo 3/4 o 4/4) secondo questo schema:

(4.1) $$\alpha_1\beta_1,\ \alpha_2\beta_2,\ \gamma_1\gamma_2,\ \gamma_1\gamma_3,\ \delta\beta_3$$

Ogni coppia di lettere (come $\alpha_1\beta_1$) indica un *periodo* (di 8 battute) che si divide in due *proposizioni* (di 4 battute ciascuna). Lettere uguali con indici numerici diversi indicano frasi variate con un carattere ritmico e melodico in comune (identiche se anche l'indice numerico è uguale); inoltre anche le proposizioni indicate con α e con β sono tra loro simili, mentre quelle indicate con γ sono in forte contrasto e costituiscono la parte indicata con *B* nella formula *ABA* (v. Fig. 32).

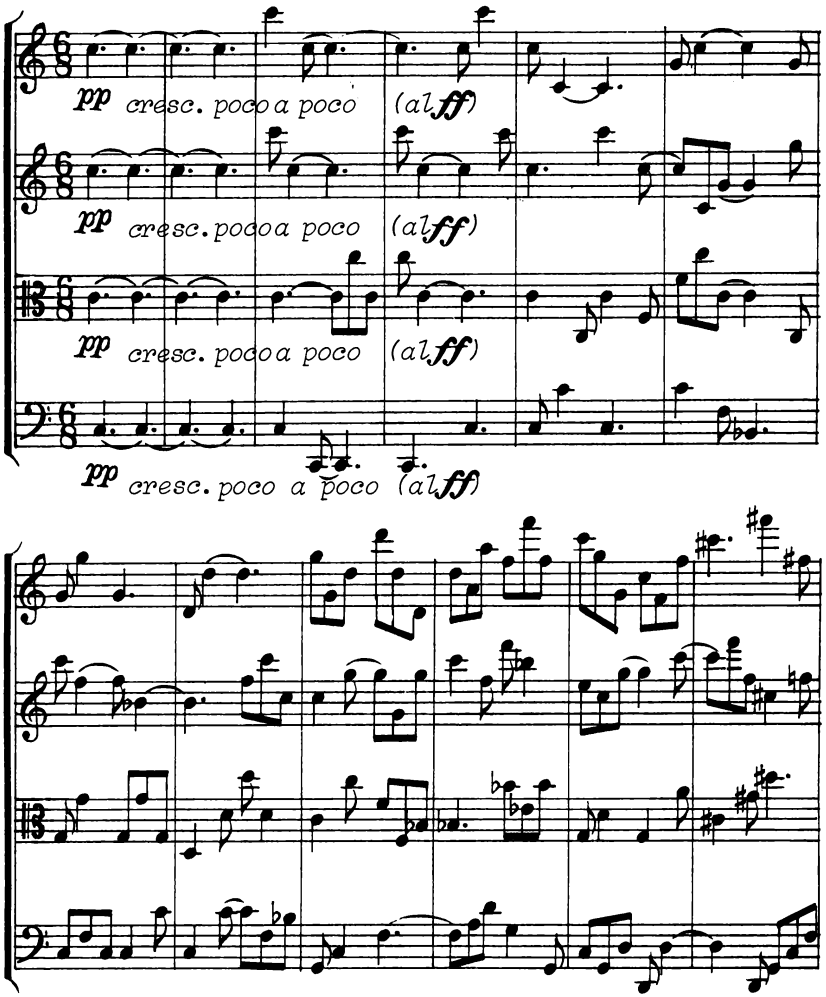
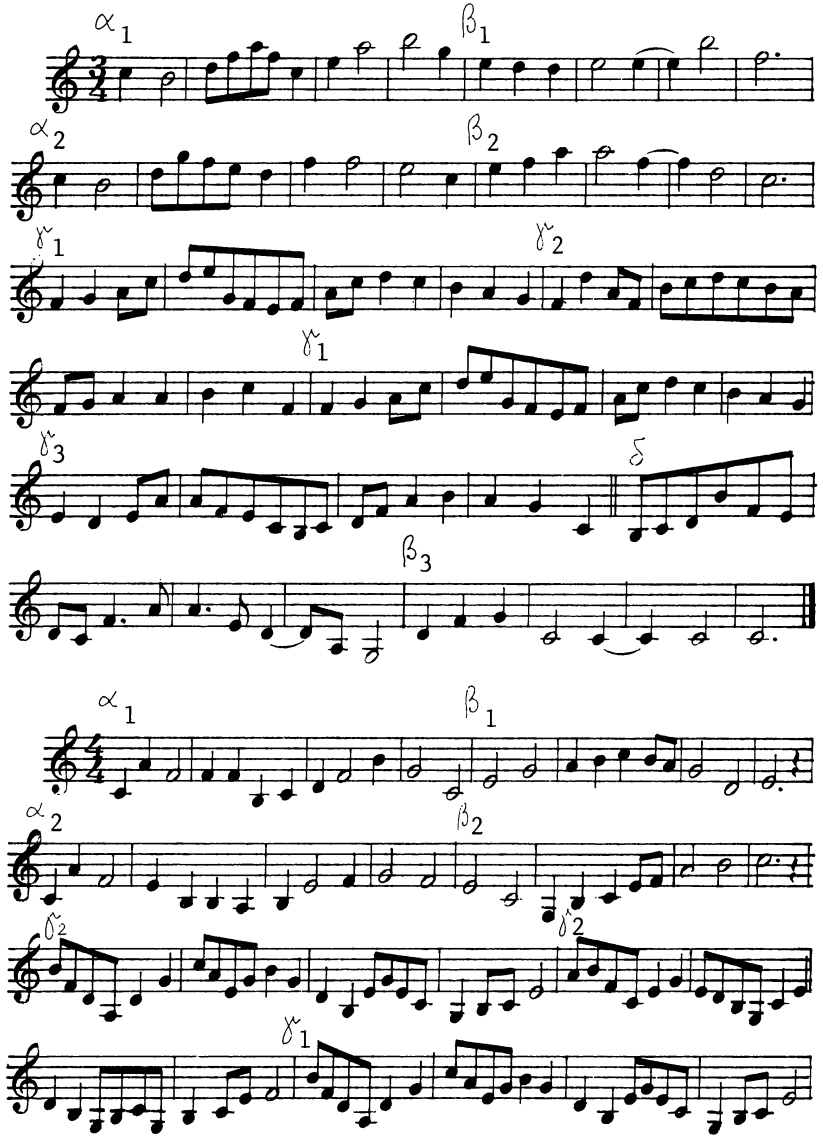


Fig. 31. Un brano della 4ª parte della suite ottenuta da Hiller e Isaacson.


α 1
β 1
α 2
β 2
γ 1
γ 2
γ 1
γ 3
δ
β 3
α 1
β 1
α 2
β 2
δ 2
δ 2
γ 1

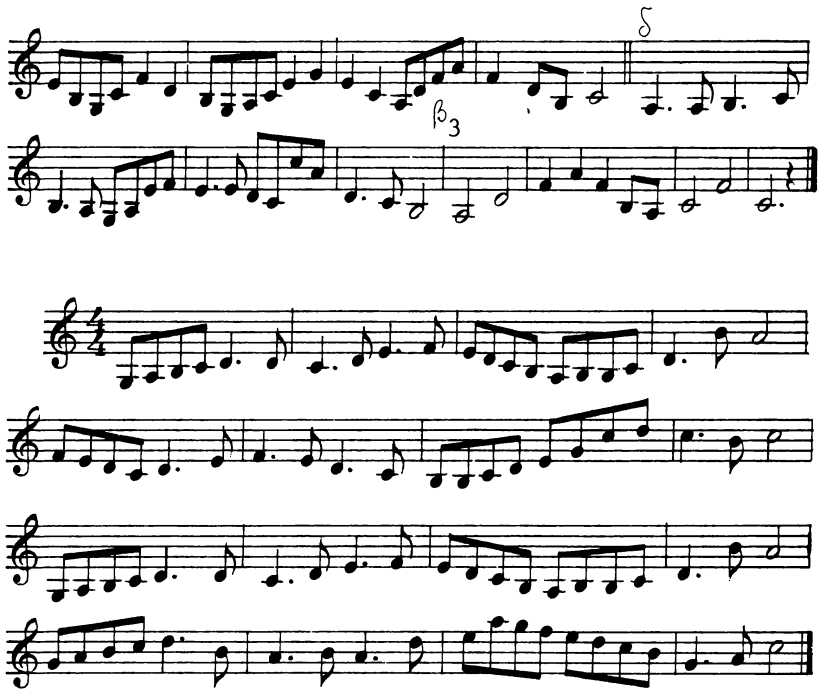


Fig. 32. Esempi di composizioni ottenute dall'autore con la macchina URAL [127].

Il processo della composizione si suddivide in due fasi:

1) Scelta di quattro ritmi per le proposizioni del tipo α, β, γ, δ.

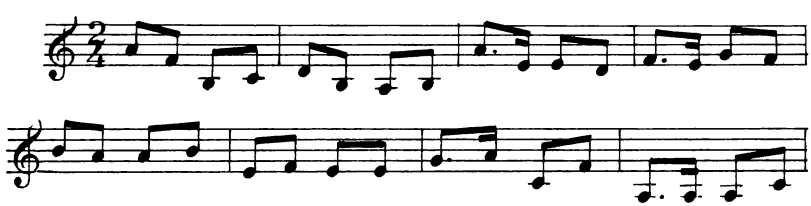
2) Composizione delle melodie seguendo i ritmi fissati come indicato nello schema (4.1).

Gli elementi delle note (durata e intervalli tra note vicine) vengono scelti dalla macchina con un processo pseudo-casuale che rispetta le frequenze statistiche di questi elementi.

Le melodie ottenute, prudentemente definite "sperimentali", sono quasi tutte molto semplici e non adatte per essere cantate a causa di intervalli critici (di 6 o di 11 semitoni) non accompagnati da altri intervalli che tengano conto del ruolo delle note rispetto all'armonia.

Nei successivi esperimenti [129-132] si è cercato di eliminare questi difetti esaminando le melodie dai quattro punti di vista fondamentali descritti nel capitolo 2. Per meglio ricercare le caratteristiche delle opere musicali che hanno un senso compiuto in una lunghezza minima, si è pensato di ridurre la struttura generale delle composizioni a 8 battute col tempo 4/4 (oppure a 16 battute col tempo 3/4), mantenendo la tonalità di do maggiore o la minore (salvo cambiamenti di tonalità per comodità di scrittura sul pentagramma). Tra le principali innovazioni ricordiamo: possibilità di temi che iniziano con una o più note *in levare* prima della nota *in battere*, traslazioni di temi fatti iniziare da un altro tono, sviluppo degli accordi armonici, variazioni di ritmi e di linee melodiche. Le melodie generate dalla macchina sono risultate più vicine alle canzoni e alla musica da ballo (v. le melodie riportate nella prima appendice). Alcuni parametri caratteristici potevano essere variati (casualmente) dalla macchina oppure dal programmatore, e in ogni caso venivano stampati insieme con la melodia risultante allo scopo di permettere esperimenti sulla corrispondenza tra i valori di questi parametri e i vari stili di composizione.

Applicando il metodo descritto precedentemente [126-128] Bucharaev e Rytvinskaja [11-12] hanno ottenuto con la macchina URAL melodie di otto battute nella scala di do maggiore. La scelta di ogni nuova nota veniva compiuta unicamente in base alla nota precedente, cioè un processo casuale che rispettava le frequenze statistiche degli intervalli tra due note consecutive. Il ritmo, cioè le durate delle note, veniva assegnato all'inizio. È stato tentato un programma per la generazione di canzoni per un testo in versi assegnato, ma come risulta dall'esempio in Fig. 33 i metodi descritti in [11-12] non erano sufficienti a questo scopo.



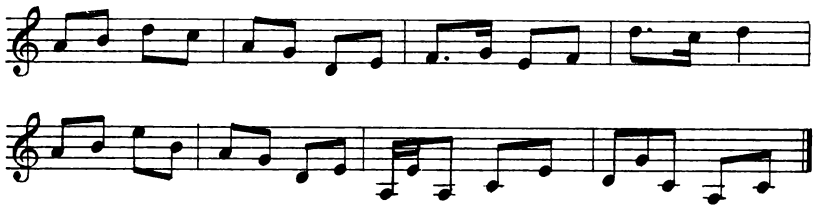


Fig. 33. Canzone composta negli esperimenti di Bucharaev e Rytvinskaja.

Per l'analisi del ritmo dei versi e la determinazione del ritmo della canzone (che come anche la linea melodica deve tener conto del contenuto del testo in versi) vedi [63, 90].

Nella breve nota [65] vengono sommariamente commentati gli esperimenti compiuti nel 1962 da Barbo sulla composizione automatica di musica polifonica a quattro voci.

Georgi e Schemmel [34] hanno preparato un programma col quale la macchina URAL doveva seguire uno stile di composizione contrappuntistico: il *cantus firmus*. Molte regole del contrappunto sono state accuratamente studiate e tradotte in un elenco di regole precise. Il ritmo è stato fissato in modo

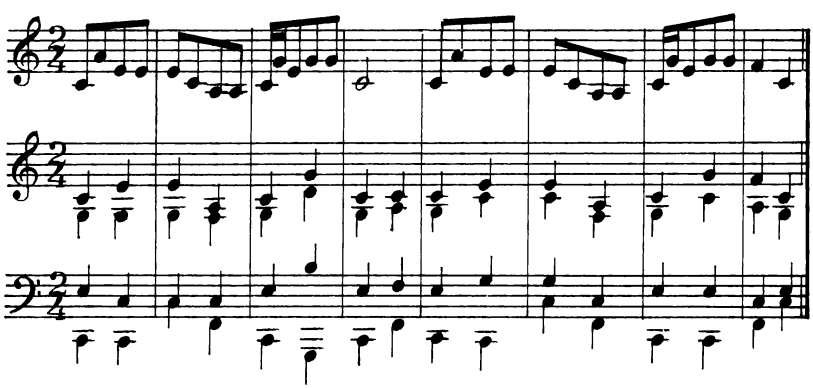
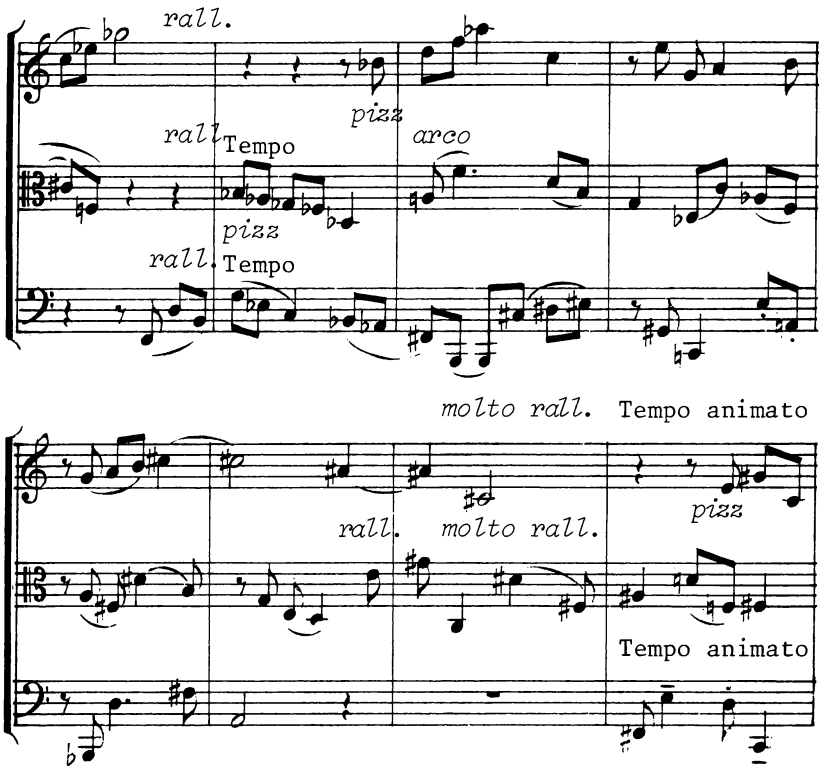


Fig. 34. Armonizzazione composta automaticamente negli esperimenti di Rytvinskaja e Šaronov [109].

molto semplice. Uno schema del programma e alcuni esempi di risultati sono stati riportati nell'articolo [34].

Rytvinskaja e Šaronov [109] hanno preparato un programma per l'armonizzazione di un brano di melodia in 8 battute nella scala di do maggiore, mediante gli accordi di tonica, dominante e sottodominante all'incirca come viene insegnato agli allievi degli istituti musicali. Nei risultati contenuti in [109], di cui viene riportato nella Fig. 34 un esempio, si notano molti errori elementari come quinte parallele, ecc.



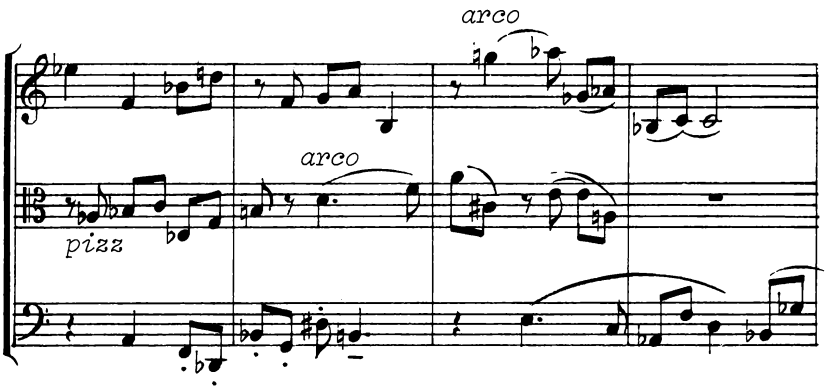
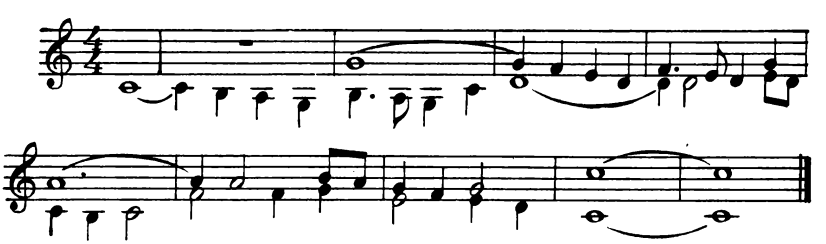


Fig. 35. Composizione dodecafonica automatica ottenuta negli esperimenti di Gill [36].

Gill [36] ha scritto un programma per la composizione della musica atonale di Schönberg chiamata dodecafonica, (v. Fig. 35), che viene stampata dalla teletype in codice numerico.

In [93] Padberg ha esposto alcune ricerche su proprietà strutturali della musica contrappuntistica e ha descritto due programmi per la composizione del *canone* e della *fuga* a due o a quattro voci, e ha studiato il "gruppo" delle "imitazioni" cioè delle ripetizioni di un tema da parte di una voce nel contesto delle altre. In questo lavoro non sono stati inclusi esempi.

Stepanov [119] ha scritto un programma per composizioni contrappuntistiche a due e a quattro voci. Seguendo uno schema generale prefissato la macchina compone anzitutto il ritmo e poi le linee melodiche delle varie voci (v. Fig. 36).



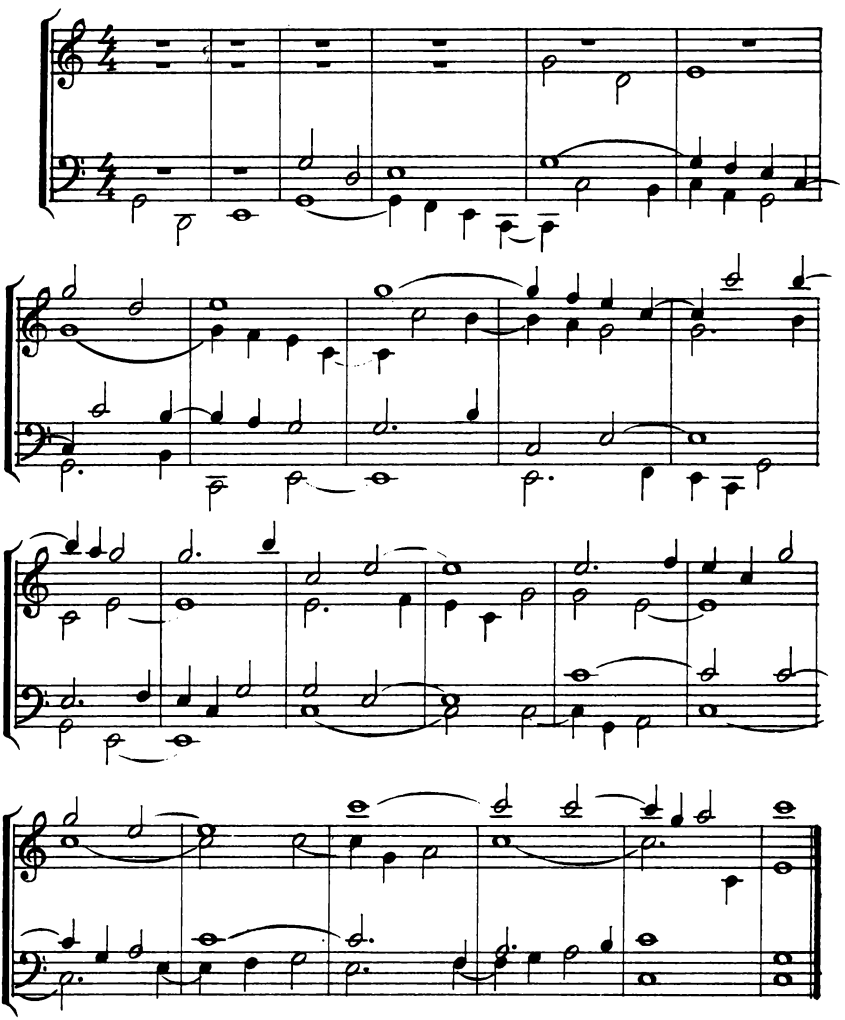


Fig. 36. Due esempi di composizioni automatiche ottenute negli esperimenti di Stepanov [119].

Detlovs [15, 16], seguendo un metodo descritto precedentemente [126-128], ha ottenuto alcune melodie in 8 battute (v. Fig. 37).
In [133, 134] l'autore ha descritto il procedimento col quale la macchina URAL-2 può armonizzare una melodia assegnata. Le regole in base alle quali la macchina costruisce e seleziona gli accordi possono essere variate dal programmatore.

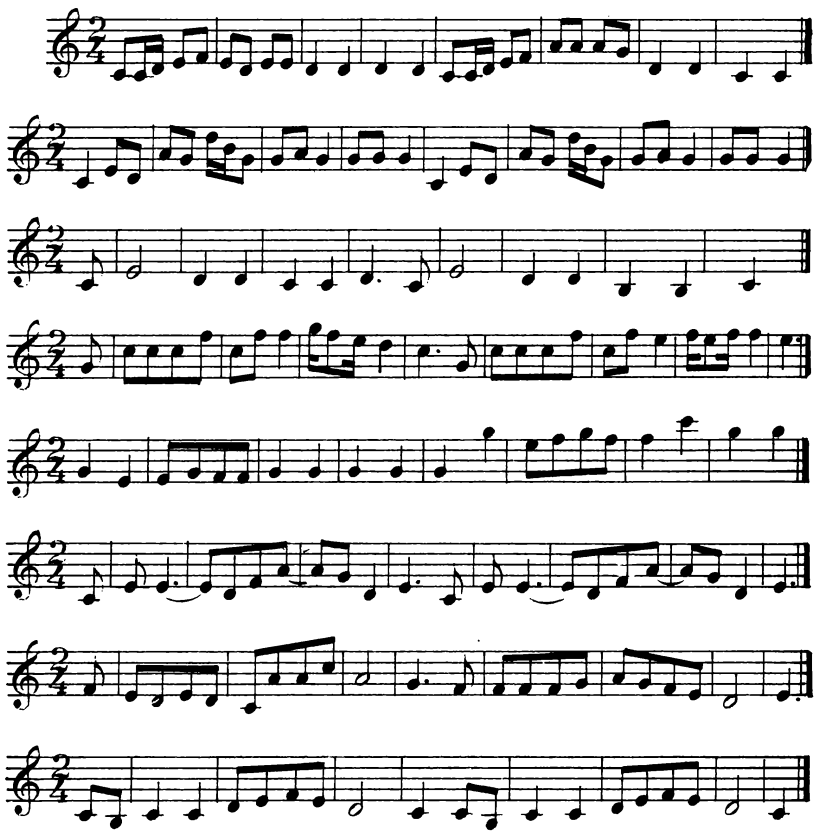


Fig. 37. Esempi di melodie ottenute negli esperimenti di Detlovs [15, 16].

Fencl [24] ha studiato lo stile delle canzoni popolari cecoslovacche e lo ha tradotto in un programma per la composizione automatica: anzitutto è stata effet-

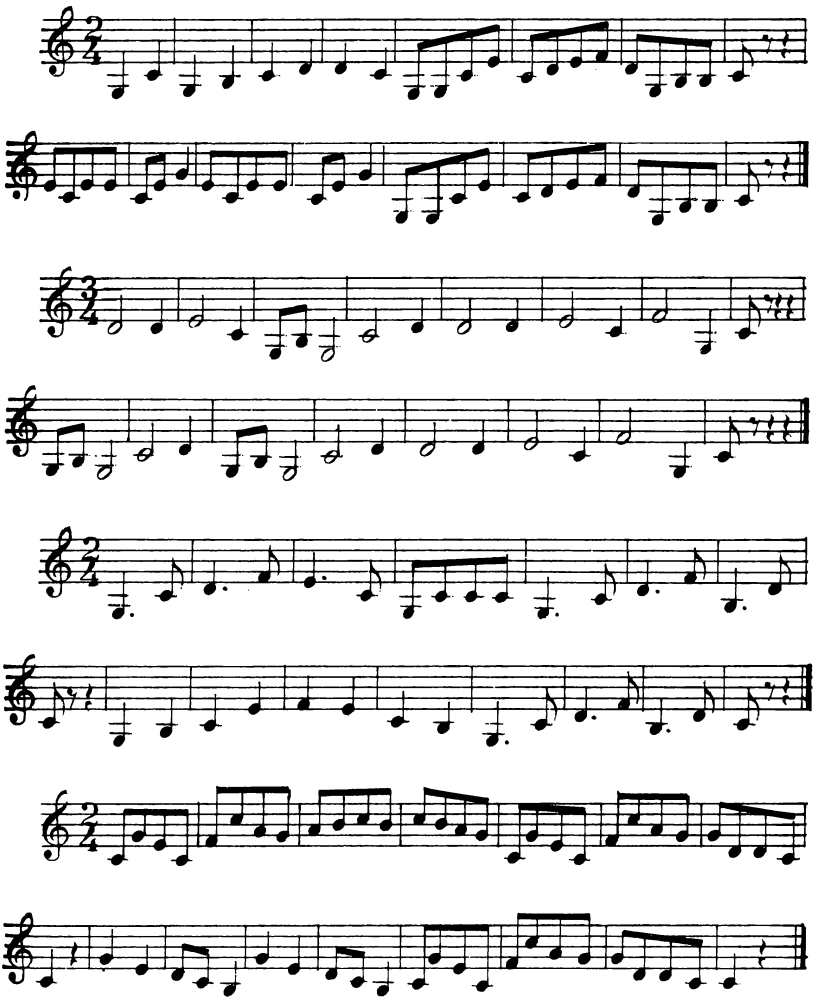


Fig. 38. Quattro melodie composte automaticamente negli esperimenti di Fencl [24].

tuata una analisi statistica di molte canzoni da quattro punti di vista: strutturale, armonico, ritmico, melodico. Seguendo questo stesso ordine venivano effettuate le corrispondenti fasi della composizione automatica. Le scelte del tempo e della struttura generale erano fatte dal programmatore prima della composizione. La suddivisione dell'opera era basata sulla formula *ABCB* dove ogni lettera indica una frase musicale di 4 battute e lettere uguali indicano frasi simili sotto i vari punti di vista menzionati. Anche all'interno di ogni frase erano previste ripetizioni di coppie di battute, (v. anche [126, 127]). Le scelte relative all'armonia, al ritmo, e alla linea melodica venivano compiute dalla macchina con un processo casuale che rispettava le probabilità di transizione desunte dall'analisi statistica compiuta all'inizio secondo gli schemi di un processo di Markov di ordine 2, cioè supponendo che gli elementi della composizione dipendano soltanto da quelli immediatamente precedenti. Per quanto riguarda lo sviluppo armonico si valutava ogni nota rispetto all'accordo di tonica, dominante, sottodominante, analogamente a quanto fatto in [129-132]. Con analogo processo la macchina sceglieva gli elementi ritmici, cioè fissava le durate delle note, e gli elementi melodici cioè sceglieva effettivamente le note, sempre tenendo conto al tempo stesso delle similitudini prescritte dallo schema generale e delle probabilità di transizioni locali prescritte dall'analisi markoviana. La musica composta veniva stampata e anche eseguita automaticamente per mezzo di apparati elettronici. Un esempio è riportato nella Fig. 38.

Nei lavori [136, 137] l'autore ha descritto un procedimento automatico che, assegnata una poesia, analizza il ritmo dei versi e determina il ritmo di una possibile melodia per farne una canzone. L'unione di questo programma con quello descritto precedentemente per la composizione della melodia (v. [132]) permette effettivamente di raggiungere questo risultato. Anche in questo lavoro molti parametri possono essere variati dal programmatore e così molti esperimenti possono essere effettuati rapidamente allo scopo di scegliere la versione che meglio tiene conto dei significati della poesia.

4.2 *Analisi delle composizioni musicali*

Sotto questo titolo si può anche annoverare il lavoro di Brooks, Hopkins, Neu-

mann, Wright [10] già esaminato nella sezione precedente, in quanto viene anzitutto compiuta, con l'aiuto della macchina elettronica, una analisi statistica di molte composizioni musicali (per determinare le frequenze delle diverse combinazioni di n note successive).

Nella musica occidentale del XX secolo si distinguono sempre più chiaramente due tipi di stili musicali: 1°: la musica che rispetta le tonalità, 2°: la musica dodecafonica stile Schönberg o affine. Da un punto di vista formale il secondo tipo è stato studiato più del primo. Ad esempio Babbit [4] ha analizzato la musica dodecafonica applicando la teoria matematica dei gruppi. In [54] Kassler descrive un procedimento algoritmico che permette di esaminare una qualsiasi successione di note e di decidere se essa soddisfa alle regole formali della musica dodecafonica. (Queste regole non hanno però alcuna relazione con la valutazione qualitativa della composizione musicale.) Questo esame di una composizione scritta può essere compiuto del tutto automaticamente con l'aiuto delle macchine che "leggono" un testo scritto mediante cellule foto-elettriche collegate con un elaboratore che analizza e riconosce i caratteri. Per ricerche di questo tipo vedi [49, 53, 56-58, 105].

Uno dei problemi più importanti per l'analisi matematica della musica consiste nell'individuare le formule che traducono in parametri quelle caratteristiche che nell'ambito di uno stile musicale rimangono pressapoco inalterate mentre cambiano più sensibilmente passando ad un altro stile (o epoca). A questo problema sono rivolte le ricerche di Fucks [27, 28], che vogliamo ora descrivere.

Dall'insieme delle composizioni di musica occidentale, coprendo un periodo di 4 secoli e mezzo, sono stati selezionati 100 brani. Di ciascuno è stata analizzata solo la parte melodica (ad es. solo la parte dei primi violini) per un tratto di 200 note consecutive. Gli elementi analizzati sono: le singole note (cioè le diverse frequenze delle varie note) e gli intervalli tra note che nella melodia in esame compaiono ad una distanza da 1 a 20 note. Lo studio delle frequenze di questi elementi ha permesso di trovare delle caratteristiche che differenziano la musica delle varie epoche e dei vari stili. Per quanto riguarda le singole note si può valutare se in un brano alcune note fondamentali sono decisamente più frequenti delle altre oppure se questa tendenza è più o meno attenuata o infine se tutte le possibili note sono egualmente frequenti. La misura σ di questa

"dispersione" (ottenuta con valutazioni statistiche) è sempre risultata crescente col passare delle epoche, come viene rappresentato nella Fig. 39.

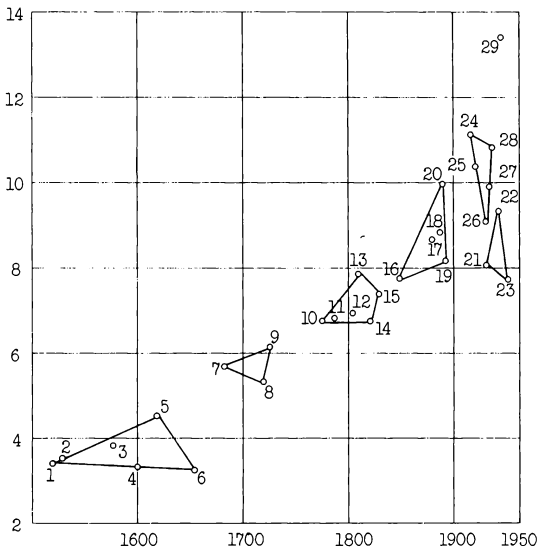


Fig. 39. La crescita della "dispersione" nelle frequenze delle note durante il periodo 1500-1960 secondo lo studio fatto da Fucks [27, 28] sui compositori: 1 = Willart, 2 = Modena, 3 = Palestrina, 4 = Hassler, 5 = Schein, 6 = Rosenmüller, 7 = Corelli, 8 = Vivaldi, 9 = Bach, 10 = Mozart (concerto per violino), 11 = Mozart (sinfonia in sol minore), 12 = Beethoven (5ª sinfonia), 13 = Beethoven (op. 74), 14 = Spohr, 15 = Schubert, 16 = Schumann, 17 = Brahms, 18 = Čiajkovskij (5ª sinfonia), 19 = Strauss, 20 = Čiajkovskij (6ª sinfonia), 21 = Hindemith, 22 = Bartok, 23 = Eck, 24 = Berg, 25 = Webern (op. 20), 26 = Berg, 27 = Webern (op. 28), 28 = Schönberg, 29 = Nono.

Una analoga analisi è stata compiuta sulle frequenze dei vari possibili intervalli che misurano la distanza sulla tastiera del pianoforte tra note che compaiono come successive nella melodia in esame. La misura della "dispersione" delle frequenze dei vari possibili intervalli (ottenuta con una analoga valutazione statistica) è stata effettuata sugli stessi compositori, raggruppati secondo le epoche, come indicato nella tabella dove per ogni gruppo di compositori viene

riportato il valore numerico medio di questa nuova valutazione χ (vedi Tab. 1).

Tab. 1.

Epoca	*Compositore*	*Composizione*	χ
1530-1650	Modena	Fantasia	2,1
	Willart	Fantasia	
	Hassler	Intrade	
	Schein	Suites	
	Palestrina	Ricercari	
	Rosenmüller	Studi	
1680-1740	Purcell	Suites	3,1
	Corelli	Concerti grossi 1 e 8	
	Vivaldi	Concerti grossi 2 e 8	
	Bach	Concerto Brandeburghese n. 3	
	Händel	Concerto grosso in re maggiore	
1780-1825	Haydn	Sinfonia « Oxford »	7,5
	Mozart	Sinfonia « Jupiter »	
	Beethoven	Sinfonia 1, 3, 5, 6, 8	
	Spohr	Concerto per violino	
1846-1900	Schumann	Sinfonie 2 e 3	10,4
	Brahms	Sinfonie 1 e 3	
	Strauss	Till Eulenspiegel	
	Strauss	Così parlò Zarathustra	
	Smetana	Moldava	
	Čiajkovskij	Sinfonie 5 e 6	
1900-1950	Prokofiev	Sinfonia n. 5	12,1
	Williams	Sinfonia pastorale	
	Ravel	Boléro	
	Hindemith	Mathis der Maler	
	Šostakovič	Sinfonie 5 e 9	
	Bartok	Suite n. 2	
	Eck	Sonata per orchestra	

continua

1922-1960	Schönberg	Quartetto d'archi op. 30	3,5
	Schönberg	Variazioni per orchestra	
	Schönberg	Concerto per violino	
	Webern	Trio d'archi op. 20	
	Webern	Bagatelle	
	Webern	Quartetto d'archi op. 5	
	Webern	Quartetto d'archi op. 28	
	Berg	Suite lirica	
	Berg	Concerto per violino	
	Berg	Quartetto d'archi op. 3	
	Nono	Variazioni	
	Nono	Incontri	
	Boulez	Le marteau sans Maître	
	Henze	Sinfonia n. 3	
	Stockhausen	« Gruppen » per 3 orchestre	
	Krenek	Quartetto d'archi op. 96	

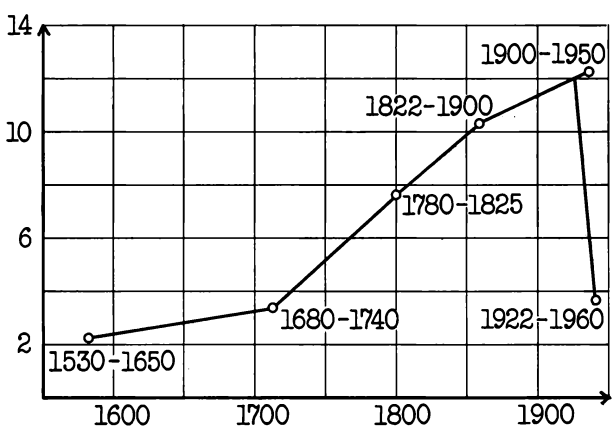


Fig. 40. La "dispersione" nelle frequenze degli intervalli tra note successive, dal 1530 al 1960, secondo lo studio fatto da Fucks [27].

I valori di χ sono anche riportati nella Fig. 40 in corrispondenza dei gruppi di compositori considerati.
Come si vede il valore di χ è cresciuto fino al 1900, per poi ramificarsi in corrispondenza di due stili diversi di musica: mentre χ seguita a crescere nella musica di Prokofiev, Hindemit, Šostakovič (ed altri), si ha invece un calo improvviso nella produzione di Schönberg, ecc., dove si ritrovano gli stessi valori di χ del 1600.
Nei lavori dell'autore [133, 134] viene descritto il programma che rende la macchina URAL-2 capace di compiere la funzione di esaminatore: l'allievo trasmette alla macchina l'armonizzazione di una melodia, e la macchina segnala le posizioni dove l'allievo ha commesso errori di armonia e stampa anche commenti sui tipi di errori. Il programma contiene un elenco di molte regole di armonia, dalle più fondamentali a quelle più raffinate, dalle più indispensabili a quelle che vengono raccomandate ad un certo livello di complessità; questo livello può essere regolato, e la macchina segnala se la composizione supera (pericolosamente) il livello prescritto.
Nel lavoro [17] di Detlovs è descritta una analisi statistica, compiuta con macchine elettroniche, sulla successione degli accordi in 20 corali di Bach: indicando gli accordi fondamentali in do maggiore con: I = (do, mi, sol), II = (re, fa, la), III = (mi, sol, si), IV = (fa, la, do), V = (sol, si, re), VI = (la, do, mi), VII = (si, re, fa), nella Tab. 2 sono riportate le frequenze di transizione dall'uno all'altro di questi accordi.

Tab. 2.

		a: I	II	III	IV	V	VI	VII
	I	63	29	3	66	121	10	34
	II	16	0	0	3	45	3	5
	III	3	0	3	0	5	3	8
da:	IV	13	8	0	8	61	3	26
	V	235	3	3	8	31	37	3
	VI	5	26	3	8	10	0	3
	VII	66	0	5	0	10	0	5

In questa tabella sono riconoscibili alcuni fatti ben noti; ad esempio l'accordo di *sottodominante* (IV) è preferibilmente seguito da quello di *dominante* (V), e l'accordo *diminuito* VII è quasi sempre seguito da quello di *tonica* (I). Quest'ultimo fatto rende minima l'*indecisione* o *entropia* dopo un accordo VII, come risulta dalla Tab. 3 dove vengono riportati i valori dell'entropia relativa a ciascuno di questi accordi.

Tab. 3.

I	II	III	IV	V	VI	VII
2,331	1,551	2,482	2,120	1,374	2,078	0,972

4.3 *Sintetizzazione automatica del suono*

I lavori orientati alla esecuzione di un suono o di una musica mediante macchine elettroniche si possono dividere in due gruppi:
Un primo scopo è quello di ottenere un timbro per imitare il suono di uno strumento classico o anche per generare timbri nuovi e per compiere ricerche acustiche. Così ad esempio si può esaminare l'influenza sul timbro del cambiamento di forma dell'onda, il tipo di "crescendo" che si ottiene aumentando non solo l'intensità ma anche la frequenza del *vibrato*, e la possibilità di ottenere un suono che inizialmente simula il timbro del pianoforte e gradualmente diventa quello di un violino, senza cambiare l'altezza della nota [43, 72-74]. Questo si ottiene facendo variare le intensità delle vibrazioni *armoniche* di una nota, cioè delle vibrazioni che hanno frequenza multipla rispetto alla frequenza fondamentale: esse come è noto caratterizzano i vari timbri. È stata anche studiata la sintetizzazione automatica del suono delle parole [124]. È stato osservato che l'orecchio umano non può tollerare a lungo i suoni sintetizzati con macchine elettroniche [123]. La causa consiste nella troppo grande e costante precisione della frequenza fondamentale, mentre la voce umana (come gli strumenti classici) presenta continuamente piccole ma significative deviazioni nella

frequenza (vibrato) e anche in tutti gli altri parametri. Ma questo è possibile farlo anche con le macchine elettroniche: per ogni parametro che caratterizza il suono (inclusi i parametri del timbro, del ritmo, della intensità, ecc.) viene assegnato un "margine" entro il quale il valore del parametro vien fatto oscillare casualmente (v. Garbuzov [29-32]). In tal modo l'effetto sgradevole viene eliminato. È chiaro che anche mantenendosi entro questi margini ci sono tanti modi di rendere un suono gradevole, e si possono avere diverse esecuzioni con diverse "particolarità espressive", (soprattutto nel caso di un esecutore umano) (v. [33, 66, 82, 83, 102-104, 110]).

In un altro gruppo di lavori (v. ad es. [14, 49, 50, 68, 70, 74, 92, 119] ecc.) si è studiato l'uso delle macchine elettroniche per l'effettiva esecuzione di brani musicali, a una o più voci, tenendo conto di tutte le informazioni codificate sulla partitura: anzitutto l'altezza e la durata di ogni nota, nonché il timbro (strumento) e tutte le indicazioni sulla esecuzione: forte, piano, staccato, rubato, ecc. Queste informazioni possono essere codificate e trasmesse alla macchina che "suona" il brano (simulando il timbro degli strumenti classici o producendo altri suoni) sulla base delle indicazioni fissate dall'uomo. Per quanto noto all'autore non sono state compiute ricerche per rendere automatica la regolazione della "espressività" di una esecuzione.

5

Un linguaggio algoritmico musicale

5.1 *Gli elementi delle composizioni musicali e la loro codificazione*

In questo capitolo viene descritto il linguaggio alla base degli esperimenti dell'autore.
Quando gli elementi di un processo naturale (come ad esempio la struttura, il ritmo, le note di una composizione) vengono codificati con un linguaggio matematico, si inquadrano sinteticamente situazioni analoghe in strutture matematiche. Sorge allora la possibilità di scoprire, col linguaggio dei numeri, relazioni logiche che fanno conoscere leggi di natura nascoste nel processo esaminato.
A tale scopo introduciamo alcuni strumenti matematici.
Consideriamo la funzione $[x]$ = parte intera di x, cioè il più grande numero intero che non supera il numero x. Si ha ad es. $[2{,}3] = 2$; $[3] = 3$; $[-1] = -1$; $[0] = 0$; $[-3{,}7] = -4$. Inoltre $|x|$ indica il valore assoluto, cioè positivo; ad es. $|-2{,}5| = 2{,}5$; $|2{,}5| = 2{,}5$.

Dati due numeri interi a, $m > 0$, il secondo dei quali si chiama *modulo*, si può considerare il *resto* b della loro divisione (e il quoziente q, pure intero)

$$a = mq + b \quad \text{dove} \quad 0 \leqslant b < m.$$

Ad esempio rispetto al modulo 7 si ha:

$$\begin{aligned} 19 &= 7 \cdot 2 + 5 \quad , \quad 0 \leqslant 5 < 7 \\ -20 &= 7 \cdot (-3) + 1, \quad 0 \leqslant 1 < 7 \\ 28 &= 7 \cdot 4 + 0 \quad , \quad 0 \leqslant 0 < 7 \end{aligned}$$

Per indicare il resto b del numero a diviso per m scriveremo:

$$b \equiv a \pmod{m}$$

1. La durata di una nota (non più breve di una *croma*) può essere codificata, modulo 8, nel modo seguente:

(5.1) $\quad \eighthnote = 1;\ \quarternote = 2;\ \dottedquarternote = 3;\ \halfnote = 4;\ \ldots;\ \wholenote = 0$

cioè con un intero proporzionale alla durata, modulo 8.

2. Oltre ad una singola nota σ di durata $L\sigma$ considereremo anche una *combinazione elementare* σ^* di durata complessiva $L\sigma^*$. Devono però essere soddisfatte le seguenti proprietà: la durata complessiva $L\sigma^*$ è quella di una *semiminima* ($\quarternote$) o un suo multiplo (e dunque la durata di una semiminima diventa l'unità di misura di $L\sigma^*$); inoltre una combinazione elementare non può essere decomponibile in più combinazioni elementari. Sono combinazioni elementari ad esempio:

$\quarternote$; $\beamedeighthnotes$; $\eighthnote\quarternote\eighthnote$; $\dottedquarternote\eighthnote$; $\halfnote$; $\dottedhalfnote$; ed altre.

Non sono invece accettabili come elementari le seguenti combinazioni che non soddisfano alle proprietà enunciate:

$\eighthnote$; $\quarternote\beamedeighthnotes$; $\beamedthirtysecondnotes$; $\quarternote\quarternote$; $\quarternote\halfnote$; ecc.

4. Come *distanza* Σ di una nota dall'inizio del brano musicale si intende la

somma delle durate complessive delle combinazioni elementari dall'inizio fino ad includere la durata della combinazione elementare di cui la nota considerata fa parte (anche se la nota non è l'ultima nota di questa combinazione). In questo calcolo non bisogna tener conto delle note di una eventuale anacrusi (per le quali si assume $\Sigma = 0$). Come già avvertito l'unità di misura è la durata di una semiminima (♩).
Così, ad esempio, per le 10 note del brano in Fig. 41 si ha rispettivamente: $\Sigma_1 = 0$, $\Sigma_2 = 0$, $\Sigma_3 = 1$, $\Sigma_4 = 2$, $\Sigma_5 = 4$, $\Sigma_6 = 5$, $\Sigma_7 = 6$, $\Sigma_8 = 7$, $\Sigma_9 = 8$, $\Sigma_{10} = 8$.

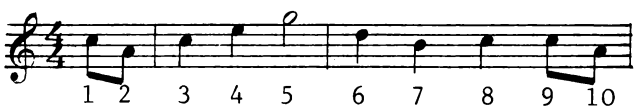


Fig. 41. Frammento melodico.

Analogamente per il brano in Fig. 42, privo di anacrusi, si ha: $\Sigma_1 = 1$, $\Sigma_2 = 2$, $\Sigma_3 = 2$, $\Sigma_4 = 3$, $\Sigma_5 = 4$, $\Sigma_6 = 4$, $\Sigma_7 = 5$, $\Sigma_8 = 8$.

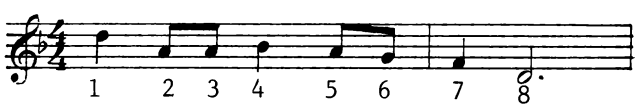


Fig. 42. Frammento melodico.

D'ora in poi i valori di Σ verranno codificati con un numero scritto nel sistema a base 8 (dove otto si scrive 10, nove si scrive 11, ecc., cioè ad es. 23 significa *due* volte otto + *tre* = diciannove).
5. Anche il "nome" di una nota si può codificare con un numero ω: do = 1, re = 2, mi = 3, fa = 4, sol = 5, la = 6, si = 7. Per poter codificare anche i "tasti neri" del pianoforte, oltre alla cifra ω ora definita introduciamo anche una cifra ζ il cui valore scatta da 0 a 4 nel caso di un "diesis". Per identificare completamente l'*altezza* di una nota (cioè la sua posizione sulla tastiera) oltre ad indi-

care il nome della nota bisogna anche precisare a quale ottava (cioè a quale gruppo di note consecutive do, . . ., si) essa appartiene. A tale scopo basta un'ulteriore cifra θ: facciamo corrispondere i valori $\theta = 0$, $\theta = 1$ alle due ottave immediatamente a sinistra del "do centrale" e i valori $\theta = 2$, $\theta = 3$ alle due ottave alla destra.
L'altezza di una nota verrà dunque codificata con un numero a due o tre cifre:

$$W = \theta\omega \quad \text{oppure} = \theta\omega\zeta \tag{5.2}$$

che la macchina interpreta come un numero intero *in base* 8. Nella Fig. 43 viene indicata la codificazione $\theta\omega$ di alcune note.

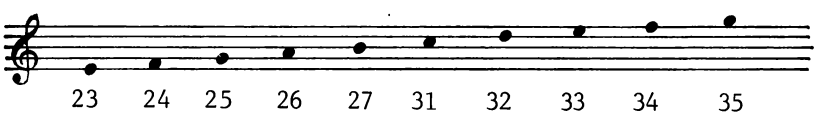


Fig. 43. Codificazione dell'"altezza".

6. Come abbiamo descritto ogni nota della melodia si codifica col numero *in base* 8 composto dalle cifre

$$\Sigma\sigma\theta\omega\zeta \tag{5.3}$$

dove Σ (che può consistere in più di una cifra) indica la distanza (misurata in semiminime: ♩) dall'inizio del brano della combinazione elementare cui la nota appartiene, σ è il codice di durata (5.1) (misurata in crome: ♪ , modulo 8), θ è il numero di ottava, ω corrisponde al nome della nota, e ζ vale 0 o 4 secondo che la nota è naturale o alterata da un diesis. Ad esempio il brano in Fig. 41 viene così codificato:

Σ	σ	θ	ω
00	1	3	1
00	1	2	6
01	2	3	1

02	2	3	3
04	4	3	5
05	2	3	2
06	2	2	7
07	2	3	1
10	1	3	1
10	1	2	6

Questo è un esempio di metodo di codificazione della melodia, e lo chiameremo *nota per nota*; altri metodi sono preferibili per la composizione automatica e per la stampa o per la esecuzione automatica.

7. Un altro metodo di codificazione, che chiameremo *battuta per battuta* è il seguente:

Ogni battuta viene trascritta sotto forma di tabella di numeri:

$$\|W_{ij}\| = \left\| \begin{matrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} & W_{14} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} & W_{24} \end{matrix} \right\| \tag{5.4}$$

dove, nell'ordine, i numeri W_{11}, W_{21}, W_{12}, W_{22}, W_{13}, W_{23}, W_{14}, W_{24} indicano l'altezza del suono nelle otto parti (di durata uguale ad una croma) nelle quali la battuta può essere suddivisa, intendendo di indicare con il numero 0 il prolungamento del suono della nota precedente (cioè codificando in questo modo le note che hanno durata superiore alla croma). Consideriamo ad esempio il brano in Fig. 44.

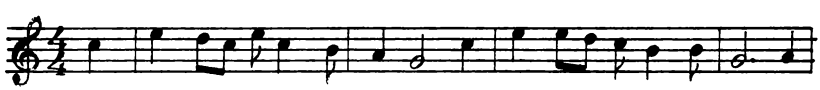


Fig. 44. Brano melodico.

Queste cinque battute vengono così codificate:

000	000	000	310
000	000	000	000
330	320	330	000
000	310	310	270
260	250	000	310
000	000	000	000
330	330	310	000
000	320	270	270
250	000	000	260
000	000	000	000

8. Volendo codificare soltanto il ritmo di una melodia si segue lo stesso schema, scrivendo però in (5.4) un qualsiasi numero convenzionale (nel nostro programma uguale a 14) al posto dei valori delle altezze dei suoni $W_{ij} \neq 0$.

9. Nella sezione 5.2 studieremo gli operatori (+) e (−) che permettono di *sommare* ad una altezza W un intervallo φ ottenendo una nuova altezza:

$$\overline{W} = W\ (+)\ \varphi \tag{5.5}$$

oppure di *sottrarre* due altezze W, W ottenendo un "intervallo":

$$\varphi = \overline{W}\ (-)\ W \tag{5.5'}$$

Lo studio degli intervalli è fondamentale sia per confrontare due note di uno stesso accordo sia per confrontare due note che si susseguono nel tempo, ad es. nella linea melodica. Gli intervalli si codificano con i valori di φ che corrispondono alle locuzioni tradizionali di: $\varphi = 0$ = intervallo di prima o unisono, $\varphi = 1$ = intervallo di seconda, $\varphi = 2$ = terza, $\varphi = 3$ = quarta, . . ., $\varphi = 7$ = ottava, ecc. Alcuni intervalli con i corrispondenti valori di φ, anche negativi, sono indicati nella Fig. 45.

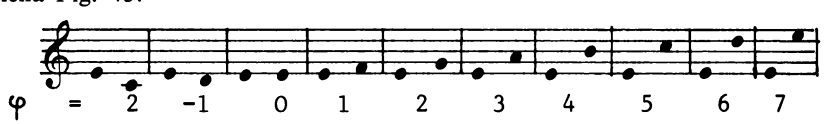


Fig. 45. Codificazione degli intervalli.

10. Vogliamo ora introdurre notazioni matematiche per codificare gli accordi. In questo libro utilizzeremo, per quanto riguarda la tonalità di do maggiore i seguenti accordi che faremo corrispondere ai valori $A = 0, 1, 2, \ldots, 7$:

	Note	*Radice o Prima*	*Notazione tradizionale*
$A = 0$	{do, re, fa, la}	re	II^7
$A = 1$	{do, mi, sol}	do	I
$A = 2$	{re, fa, la}	re	II
$A = 3$	{mi, sol, si}	mi	III
$A = 4$	{do, fa, la}	fa	IV
$A = 5$	{re, sol, si}	sol	V
$A = 6$	{do, mi, la}	la	VI
$A = 7$	{re, fa, sol, si}	sol	V^7

Con termini tradizionali il primo e l'ultimo si chiamano *accordi di settima*, mentre gli altri *triadi.*
Intendiamo che le note indicate (tre o quattro) vanno prese da tutte le quattro ottave $\theta = 0$, $\theta = 1$, $\theta = 2$, $\theta = 3$, ottenendo così per ogni accordo le (dodici o sedici) note rappresentate e codificate col codice $\theta\omega$ nella tabella 4 dove nella prima colonna è indicato il numero d'ordine α delle note, a partire dal basso, (scritto *in base* 8).

Per ogni fissato A consideriamo i tre (o quattro) nomi delle note del corrispondente accordo e la loro codificazione:

$$\Omega_A = \{\omega_0, \omega_1, \omega_2\} \text{ oppure } \{\omega_0, \omega_1, \omega_2, \omega_3\} \tag{5.6}$$

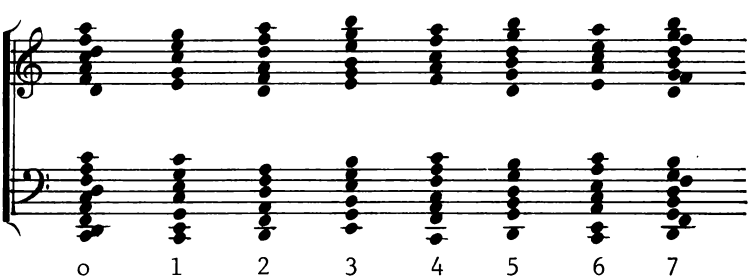
dove:

$$1 \leqslant \omega_0 < \omega_1 < \omega_2 \; (< \omega_3) \leqslant 7$$

Assegnati questi tre (o quattro) codici ω_i potremo definire come *A-accordo* l'insieme delle note:

Tab. 4

α	A							
	0	1	2	3	4	5	6	7
17	36							37
16	34							35
15	32							34
14	31							32
13	26	35	36	37	36	37	36	27
12	24	33	34	35	34	35	33	25
11	22	31	32	33	31	32	31	24
10	21	25	26	27	26	27	26	22
7	16	23	24	25	24	25	23	17
6	14	21	22	23	21	22	21	15
5	12	15	16	17	16	17	16	14
4	11	13	14	15	14	15	13	12
3	06	11	12	13	11	12	11	07
2	04	05	06	07	06	07	06	05
1	02	03	04	05	04	05	03	04
0	01	01	02	03	01	02	01	02



(5.7) $$W_\alpha = \theta_\alpha \omega_\alpha \quad \text{con } \alpha = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \ldots$$

dove i codici ω_α si ripetono periodicamente ogni tre (o quattro)

(5.8) $$\omega_{\alpha'} = \omega_\alpha \quad \text{con } \alpha \equiv \alpha' \text{ (mod 3 oppure 4)}$$

mentre i codici θ_α che indicano le ottave scattano da 0 a 1 a 2 a 3 ogni tre (o quattro) valori di α:

$$\theta_\alpha = \left[\frac{\alpha}{3}\right], \text{ oppure } = \left[\frac{\alpha}{4}\right], \text{ con } [x] = \text{parte intera di } x$$

Tra le note di un accordo, quella che tradizionalmente si chiama *radice* o *prima* potrà qui essere definita come quella il cui codice ω vale:

(5.9) $$\omega^0 = \left\{ \begin{array}{l} = 2 \text{ se } A = 0 \\ = A \text{ se } 1 \leqslant A \leqslant 6 \\ = 5 \text{ se } A = 7 \end{array} \right\}$$

e si controlla subito che negli A-accordi considerati (v. Tab. 4) esistono effettivamente valori di α^0 per cui

(5.10) $$\omega_{\alpha^0} = \omega^0$$

Le note successive i cui codici ω valgono

$$\omega_{\alpha^0+1}, \omega_{\alpha^0+2}, \text{ (ed } \omega_{\alpha^0+3} \text{ se } A = 0 \text{ o } 7)$$

si chiamano rispettivamente *terza*, *quinta*, (*settima*).
Si definisce infine come A_π-*accordo*, che si chiama anche *rivolto di ordine* π dell'A-accordo fondamentale, la successione:

(5.10′) $$W_{\alpha^0+\pi}, W_{\alpha^0+\pi+1}, W_{\alpha^0+\pi+2}, (W_{\alpha^0+\pi+3} \text{ se } A = 0 \text{ o } 7)$$

cioè la successione delle note ottenuta partendo dalla radice o prima, dalla terza, dalla quinta, (dalla settima) rispettivamente se l'ordine del rivolto vale $\pi = 0, 1, 2, (3)$.
Ad esempio l'1_2-accordo è: {sol, do, mi}.

5.2 *Operazioni sulle altezze e sugli intervalli*

1. Vogliamo qui studiare gli operatori (+) e (−) usati nelle (5.5) (5.5′). Se ad esempio indicassimo tutti i tasti bianchi del pianoforte, dal più basso al più acuto, con un numero d'ordine progressivo, allora gli operatori (+) e (−) si ridurrebbero semplicemente all'addizione e alla sottrazione. È però preferibile, per evitare statistiche e calcoli privi di senso musicale, conservare per l'altezza delle note la codificazione $\theta\omega\zeta$ introdotta nella (5.2). A questo punto, poiché il codice ω che indica il nome della nota ($\omega = 1 =$ do, . . ., $\omega = 7 =$ si) assume 7 valori, sarebbe ideale avere una macchina che lavora con i numeri in base 7 anziché 8, ma come vedremo, un piccolo accorgimento nei calcoli permette di lavorare con numeri scritti in base 8, con forte economia di memoria e tempo macchina.
2. Sia W l'altezza di una nota, codificata con le cifre $\theta\omega$, e sia φ un numero intero anch'esso scritto in base 8. La tabella 5 indica l'altezza della nota:

$$\overline{W} = W\ (+)\ \varphi \tag{5.11′}$$

cioè della nota che si ottiene a partire da W con un intervallo di ampiezza φ. Ad esempio in corrispondenza di $W = 26$ e di $\varphi = 3$ nella Tab. 5 si trova $\overline{W} = 26\ (+)\ 3 = 32$, e questo significa che partendo dal la ($\omega = 6$) della ottava subito a destra del do centrale ($\theta = 2$) e facendo 3 passi verso destra ($\varphi = 3$) si giunge al re ($\omega = 2$) della ottava successiva ($\theta = 3$).

La relazione (5.11′) si può anche scrivere:

$$W = \overline{W}\ (-)\ \varphi \tag{5.11″}$$

$$\varphi = \overline{W}\ (-)\ W \tag{5.11‴}$$

Tab. 5

W	φ																	
	−10	−7	−6	−5	−4	−3	−2	−1	0	1	2	3	4	5	6	7	10	11	12
16	05	06	07	11	12	13	14	15	16	17	21	22	23	24	25	26	27	31	32
17	06	07	11	12	13	14	15	16	17	21	22	23	24	25	26	27	31	32	33
21	07	11	12	13	14	15	16	17	21	22	23	24	25	26	27	31	32	33	34
22	11	12	13	14	15	16	17	21	22	23	24	25	26	27	31	32	33	34	35
23	12	13	14	15	16	17	21	22	23	24	25	26	27	31	32	33	34	35	36
24	13	14	15	16	17	21	22	23	24	25	26	27	31	32	33	34	35	36	37
25	14	15	16	17	21	22	23	24	25	26	27	31	32	33	34	35	36	37	41
26	15	16	17	21	22	23	24	25	26	27	31	32	33	34	35	36	37	41	
27	16	17	21	22	23	24	25	26	27	31	32	33	34	35	36	37	41		
31	17	21	22	23	24	25	26	27	31	32	33	34	35	36	37	41			
32	21	22	23	24	25	26	27	31	32	33	34	35	36	37	41				
33	22	23	24	25	26	27	31	32	33	34	35	36	37	41					
34	23	24	25	26	27	31	32	33	34	35	36	37	41						
35	24	25	26	27	31	32	33	34	35	36	37	41							
36	25	26	27	31	32	33	34	35	36	37	41								
37	26	27	31	32	33	34	35	36	37	41									
41	27	31	32	33	34	35	36	37	41										

Anche per questo operatore (−) il risultato si ottiene facendo uso della Tab. 5: conservando i numeri dell'esempio precedente, cioè con $\overline{W} = 32$, $\varphi = 3$ nella 3ª colonna della tabella il numero 32 si trova in corrispondenza della riga $W = 32$ (−) $3 = 26$. Analogamente conoscendo $\overline{W} = 32$ e $W = 26$ si individua la colonna $\varphi = 32$ (−) $26 = 3$.
Vediamo tre altri esempi:

$$W = 23, \quad \varphi = -5, \quad \overline{W} = 23 \ (+) \ -5 = 15;$$
$$\overline{W} = 22, \quad \varphi = -5, \quad W = 22 \ (-) \ -5 = 27;$$
$$\overline{W} = 22, \quad W = 26, \quad \varphi = 22 \ (-) \ 26 = -4.$$

3. Vediamo ora le formule che permettono alla macchina di calcolare i risultati degli operatori (+) e (−) senza far uso di tabelle.
Consideriamo la funzione [[x]] così definita (v. Fig. 46):

$$[[x]] = \begin{cases} = -1 \text{ per } -1 < x \leqslant 0 \\ = \quad 0 \text{ per } \quad 0 < x < 1 \\ = \quad 1 \text{ per } \quad 1 \leqslant x < 2 \end{cases}$$

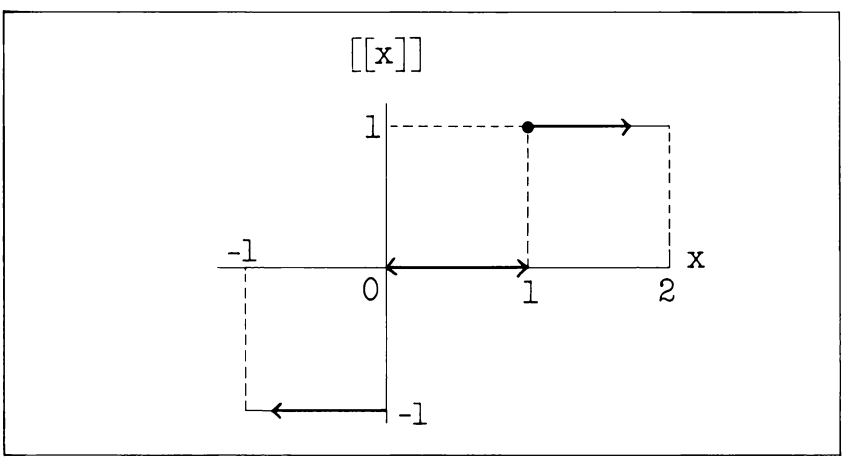


Fig. 46. Grafico della funzione $[[x]]$.

Assegnata la nota $W = \theta\omega$, e l'intervallo φ (anche esso scritto in base otto come tutti i numeri che ora consideriamo), il risultato di $W(+)\varphi$ si ottiene con le formule:

(5.12) $$\bar{\varphi} \equiv |\varphi| \pmod 7$$

(5.13) $$\Phi = \frac{|\varphi| - \bar{\varphi}}{7}$$

$$\sigma = [[\frac{\omega + (\text{sign } \varphi)\,\bar{\varphi}}{10}]] \tag{5.14}$$

$$W(+)\,\varphi = \theta\omega\,(+)\,\varphi = \theta\omega + (\text{sign } \varphi)\,\Phi\bar{\varphi} + \sigma \tag{5.15}$$

Partiamo ad esempio dalla nota $W = 32$ cioè dalla nota "re" ($\omega = 2$) dell'ottava $\theta = 3$. (Si noti che 32 in base otto significa 3 per otto + 2 = ventisei). Partendo da questa nota e contando i tasti bianchi del pianoforte spostiamoci verso *sinistra* di *undici* passi: la nota di arrivo sarà il risultato di $32\,(+)\,\varphi$ dove φ è l'intervallo $\varphi = -13$ (che in base otto significa: meno undici). Eseguendo i calcoli (5.12)... (5.15) si trova:

$$\bar{\varphi} = |-13| \text{ (mod 7)} = \text{il resto di undici diviso sette} = 4$$

$$\Phi = \frac{\text{undici} - 4}{7} = 1$$

$$\text{sign } \varphi = -1 \text{ (il segno di } \varphi \text{ che è negativo)}$$

$$\sigma = [[\frac{2 - 4}{\text{otto}}]] = [[-\text{ zero virgola venticinque}]] = -1$$

e infine osservando che le cifre $\Phi\bar{\varphi}$ compongono il numero 14:

$$W(+)\,\varphi = 32 - 14 - 1 = \text{ventisei} - \text{dodici} - 1 = \text{tredici} = 15$$

cioè si giunge al sol ($\omega = 5$) dell'ottava $\theta = 1$.
Lasciamo al lettore la verifica sul pianoforte. Il termine correttivo σ rimedia al fatto che lavoriamo con numeri in base *otto* mentre le note di una ottava sono *sette*.
Per quanto riguarda l'operatore (−) se esso è usato nel senso (5.11″) cioè per sottrarre da una nota un intervallo, ci si riconduce all'operatore (+):

$$W(-)\,\varphi = W(+) - \varphi \tag{5.16}$$

se invece è usato nel senso (5.11‴) cioè per determinare un intervallo come differenza di due note allora il risultato è fornito dalla formula:

(5.17) $W_1 \,(-)\, W_2 = \theta_1\omega_1 \,(-)\, \theta_2\omega_2 = W_1 - W_2 - (\theta_1 - \theta_2)$

Vediamo due esempi:

$$W = 22,\ \varphi = -5;\ 22\ (-)\ -5 = 22\ (+)\ 5 = 27$$

$$W_1 = 33,\ W_2 = 23;\ 33\ (-)\ 23 = 33 - 23 - 1 = 7$$

5.3 *Scelta casuale di elementi*

1. Nel processo di composizione automatica si rende continuamente necessaria, come vedremo, l'estrazione di numeri casuali. Nella macchina elettronica questo non è esattamente possibile, ma come è noto è possibile programmare algoritmi che generano successioni di numeri pseudocasuali da usare come numeri estratti a caso.
2. I numeri pseudocasuali vengono usati dalla macchina elettronica nel seguente modo:
Nella memoria della macchina è codificato un lungo elenco di regole di composizione che rappresentano il risultato dell'analisi statistica di molte composizioni musicali codificate nel modo matematico che abbiamo incominciato a descrivere; durante la composizione automatica ogni numero pseudocasuale generato viene interpretato come la codificazione di una possibile nota con la quale si potrebbe proseguire la composizione: se la nota soddisfa l'insieme delle regole essa è effettivamente accettata e si prosegue, altrimenti si esamina invece un altro numero pseudocasuale.
In realtà si segue un procedimento un po' più complesso: ad esempio ogni numero pseudocasuale non propone completamente una nota (o un accordo) ma soltanto un suo aspetto (la durata, l'altezza, gli intervalli, ecc.) e la scelta di una nota avviene "in tappe successive".

5.4 *Principi generali dell'algoritmo di composizione*

Introduciamo alcuni concetti preliminari:

1. Per *tipo di composizione* intendiamo un genere di musica individuabile sia dal punto di vista intuitivo dello stile musicale sia dal punto di vista matematico di alcune caratteristiche presenti nella codificazione del brano musicale. Ad esempio sono tipi di composizione la melodia cantabile, la musica da ballo, la marcia, il valzer, ecc.

2. I parametri caratteristici dei vari tipi di composizione si possono classificare in tre gruppi che indicheremo con α, β, γ:
I parametri α sono quelli che *fanno scegliere tra un certo numero di possibilità.* Ad esempio uno dei parametri α è la misura del tempo che può essere 3/4 o 4/4. Un altro parametro α è il numero di note dell'anacrusi cioè delle note in levare che precedono la prima nota accentata del tema; questo numero di note può essere 1 (♩), 2 (♫), 3 (♪♫), 0 (assenza di anacrusi). Un altro parametro α è l'insieme degli accordi ammessi; questo insieme può essere ridotto agli accordi {I, IV, V} cioè agli accordi di tonica, sottodominante e dominante, oppure può essere una raccolta più ricca di accordi. Un altro parametro α è il numero dei nomi delle note ammesse nella melodia che può essere 5 nel caso della musica pentatonica, 7 nel caso della musica che si può suonare sui soli tasti bianchi del pianoforte, e 12 *ad esempio* nella musica dodecafonica. Infine un altro parametro α è quello che determina le lunghezze (in battute) delle successive frasi musicali: si può ad esempio scegliere la struttura (2 + 2 + 1 + 1 + 2) come nella Fig. 9, oppure le strutture (2 + 2 + 4), (1 + 1 + 2 + 1 + 1 + 2), (2 + 2 + 2 + 2), ecc.
I parametri β sono quelli che fissano le leggi di probabilità di vari elementi della composizione; un valore di un parametro β viene dato con una tabella di frequenze di certi elementi. Un parametro β è ad esempio la tabella delle probabilità dei possibili intervalli tra due note consecutive della melodia, e può avere ad esempio i due valori seguenti:

$$M_1 = \begin{pmatrix} \text{seconda:} & 1/2 \\ \text{terza:} & 1/4 \\ \text{quinta:} & 1/4 \end{pmatrix}, \quad M_2 = \begin{pmatrix} \text{seconda:} & 7/8 \\ \text{terza:} & 1/16 \\ \text{quinta:} & 1/16 \end{pmatrix}$$

Queste frazioni indicano con quale frequenza media si deve scegliere il corrispondente intervallo durante la composizione. Nelle melodie di stile M_1 gli

intervalli di terza e di quinta compaiono in media *complessivamente* con la stessa frequenza degli intervalli di seconda. Le melodie di stile M_2 avranno invece una linea più fluida per la maggior frequenza degli intervalli di seconda (come sol - la - si - do - si - la - si). Un altro parametro β è l'analoga tabella delle probabilità delle durate delle note, ecc.

I parametri γ sono quelli che corrispondono alle norme di composizione elencate nella memoria della macchina. I due valori possibili: -1, $+1$ di un parametro γ indicano se una certa norma di composizione, nell'attuale stile scelto, può essere ignorata o deve effettivamente essere seguita. Così avviene ad esempio per il ben noto divieto di "quinte parallele", per il "riempimento del salto" descritto nella sezione 2.2 (punto 2), ecc. Grazie ai parametri γ qualsiasi norma già programmata può essere ignorata dalla macchina: basta dare al corrispondente parametro γ il valore -1.

3. Consideriamo un qualsiasi tipo di composizione T_n. Prendendo in esame un insieme di composizioni di tipo T_n si nota che non tutti i parametri sono essenziali per individuare le caratteristiche che differenziano T_n dagli altri tipi. Chiameremo *parametro essenziale* per le composizioni di tipo T_n un parametro χ (che può essere un parametro α oppure β oppure γ) il quale nella grande maggioranza delle composizioni di questo tipo assume un solo valore χ_n tra i suoi valori possibili. Gli altri parametri verranno chiamati *secondari.* Il valore χ_n verrà chiamato *valore essenziale* del parametro χ per le composizioni di tipo T_n.

Ad esempio per un valzer è "essenziale" che il tempo sia 3/4 mentre il numero di note dell'anacrusi è secondario. Per una melodia cantabile è "essenziale" che gli intervalli di "seconda" siano molto frequenti. Per una armonizzazione *molto* semplice è "essenziale" che gli accordi si riducano a: {I, IV, V}.

4. Sia

$$P = \{\alpha_1, \alpha_2, \ldots \alpha_i \ldots \beta_i \ldots \gamma_i \ldots\} \tag{5.18}$$

l'insieme ordinato dei parametri. Indicheremo con

$$P_n = \{\alpha_{1n}, \alpha_{2n}, \ldots \alpha_{in} \ldots \beta_{in} \ldots \gamma_{in} \ldots\} \tag{5.19}$$

i valori di questi parametri che caratterizzano il tipo T_n di composizione: ad esempio se il parametro α_1 è essenziale per T_n allora α_{1n} indica il valore essenziale, mentre se α_1 è secondario per T_n allora $\alpha_{1n} = 0$ e cioè la macchina è libera di scegliere a caso il valore di α_1.

5. I valori (5.19) vengono trasmessi alla macchina. In corrispondenza dei valori $=0$ la macchina estrae un numero (pseudo)casuale e in base ad esso attribuisce al parametro uno dei suoi valori possibili. Dopo aver così modificato i valori (5.19) avviene la composizione automatica. Questo procedimento può essere ripetuto per ottenere alcune composizioni di tipo T_n.

5.5 *Corrispondenza tra il tipo di composizione e i valori dei parametri*

Quando la macchina stampa una composizione ottenuta in base al programma e ai valori (5.19) dei parametri, anche questo insieme di valori viene stampato. È così possibile conoscere anche quei valori che sono stati estratti a caso dalla macchina ed è possibile studiare il loro effetto negativo o positivo. In base a questo studio si possono effettuare ulteriori esperimenti, con altre scelte (5.19), per sperimentare nuove ipotesi di teorie musicali.

6

Composizione di melodie con il calcolatore elettronico

6.1 *Elementi fondamentali del calcolo di melodie*

Le nozioni fondamentali del metodo che stiamo presentando per il calcolo automatico di melodie sono le seguenti:

1. Intendiamo come *melodia* un brano musicale breve ma di senso compiuto, articolato in "frasi" come già considerato nei capitoli precedenti, e che inizia e termina in una stessa tonalità maggiore o minore, alla cui scala tutte le note della melodia devono appartenere. Se ad esempio la composizione è in do maggiore sono consentite, nel corso del brano, battute per le quali un buon accompagnamento introdurrebbe modulazioni *in altre tonalità*, ma in tali battute la melodia deve essere composta da quelle note della corrispondente scala che appartengono anche alla scala di do maggiore (tasti bianchi). Per una tonalità minore del brano è prevista la scala minore armonica (ad es. il la minore, coi tasti bianchi salvo il sol diesis).

2. Prescindiamo completamente dalle nozioni relative alla esecuzione, come *legato*, *pizzicato*, *piano*, *forte*, *rubato*, ecc. e come anche il timbro, o le limita-

zioni di altezza delle note che si possono suonare con uno strumento, i cambiamenti di tonalità dell'intero brano, ecc.
Vengono invece presi in considerazione i seguenti aspetti:

a) *Ritmo*, cioè determinazione delle durate delle note.
b) Linea *melodica*, cioè "altezza" delle note, ossia anche ampiezza e segno degli intervalli tra due note successive.
c) Sviluppo *armonico*, cioè composizione della melodia sullo sfondo di un accompagnamento predeterminato e poi omesso, ma che rimane "implicito" nella melodia.
d) Struttura *intervallare*, cioè una articolazione in frasi che permette di ripetere (con variazioni) configurazioni ritmiche o melodiche.

3. Il linguaggio che adottiamo per trattare gli elementi della melodia, cioè per codificarli matematicamente e per ottenere un procedimento di calcolo che li genera, è il linguaggio algoritmico descritto nel capitolo 5.
4. Il programma, facendo ricorso durante la composizione ad un generatore di numeri casuali, può dar luogo ad un numero praticamente illimitato di melodie diverse.

6.2 *Gruppi ritmici e melodici*

1. Faremo uso delle seguenti sette combinazioni di durata:

1 = , 2 = , 3 = , 4 = , 5 = , 6 = , 7 =

che codificheremo con $\sigma^* = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$.
Diremo "gruppo ritmico" R l'insieme di alcune di queste combinazioni di durata con l'indicazione delle loro frequenze:

$$R = \begin{pmatrix} \sigma_1^* & \sigma_2^* & \dots & \sigma_k^* \\ p_1 & p_2 & \dots & p_k \end{pmatrix} \tag{6.1}$$

dove $p_1 + p_2 + \dots + p_k = 1$.

Nel nostro programma vengono usati i seguenti sei gruppi ritmici:

$$R_0 = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 1/2 & 1/2 \end{pmatrix}, \quad R_1 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1/2 & 1/4 & 1/4 \end{pmatrix}, \quad R_2 = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1/2 \end{pmatrix}$$

$$R_3 = \begin{pmatrix} 3 & 4 & 5 \\ 1/2 & 1/4 & 1/4 \end{pmatrix}, \quad R_4 = \begin{pmatrix} 3 & 4 \\ 1/2 & 1/2 \end{pmatrix},$$

$$R_5 = \begin{pmatrix} 6 \\ 1 \end{pmatrix}, \; R_6 = \begin{pmatrix} 7 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Se per esempio in una battuta si fissa il gruppo R_2 allora quella battuta verrà composta con semiminime (♩) e minime (𝅗𝅥) con uguali probabilità.
Con riferimento alla notazione generale (6.1) per scegliere questa o quella combinazione σ_n^* rispettando le corrispondenti probabilità p_n la macchina procede nel modo che si può così descrivere:
Si suddivide l'intervallo da zero a uno in intervalli di lunghezza $p_1, p_2, \ldots, p_k$ mediante i punti di suddivisione:

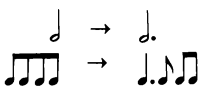
$$0, p_1, p_1 + p_2, p_1 + p_2 + p_3, \ldots, p_1 + p_2 + \ldots + p_k = 1$$

e per scegliere σ_n^* cioè il valore di n si estrae un numero casuale p tale che $0 \leqslant p < 1$ e si esegue il seguente algoritmo:

(6.2) assegniamo inizialmente ad n il valore $n = 1$; → consideriamo se attualmente risulta $p < p_1 + \ldots + p_n$: *se ciò è vero* allora il numero estratto p cade nell'intervallo n-esimo e di conseguenza σ_n^* con l'attuale valore di n viene scelto e il processo ha termine; *se invece ciò non è ancora vero* allora si riparte dal punto segnato con la freccia tentando un nuovo valore di n aumentato di una unità.

Osservazione: il programma ha una doppia possibilità: può comporre melodie col tempo 4/4 o col tempo 3/4. A tale scopo è però sufficiente avere un

programma che compone col tempo 4/4 perché da ogni battuta in 4/4 si possono poi facilmente ricavare due battute in 3/4: ad esempio con modifiche del seguente tipo



ecc.

(ottenendo così 16 battute in 3/4 da 8 battute in 4/4).

2. Per passare dall'altezza W di una nota all'altezza W (+) φ della nota successiva faremo uso di intervalli φ con ampiezza massima di una ottava cioè tali che il valore assoluto $|\varphi|$ può valere:

$$|\varphi| = 0 \text{ oppure } 1 \text{ oppure } 2 \ldots \text{ oppure } 7.$$

Diremo *gruppo melodico M* l'insieme di alcune di queste ampiezze di intervallo con l'indicazione delle loro frequenze:

$$M = \begin{pmatrix} \varphi_1 & \varphi_2 & \cdots & \varphi_k \\ q_1 & q_2 & \cdots & q_k \end{pmatrix} \tag{6.3}$$

dove $q_1 + q_2 + \ldots + q_k = 1$.
In altre parole un gruppo melodico stabilisce le frequenze delle ampiezze ammissibili degli intervalli tra due note consecutive.
Nel nostro programma vengono usati i seguenti quattro gruppi melodici:

$$M_0 = \begin{pmatrix} 2 & 3 & 1 \\ 1/2 & 1/4 & 1/4 \end{pmatrix}, \quad M_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 1/2 & 1/4 & 1/4 \end{pmatrix}$$

$$M_2 = \begin{pmatrix} 0 & 3 & 5 & 7 \\ 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/4 \end{pmatrix}, \quad M_3 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/2 & 1/4 & 1/4 \end{pmatrix}$$

Per scegliere questa o quella ampiezza φ_n in modo da rispettare le corrispondenti probabilità q_n la macchina procede in modo analogo a quello descritto

per il gruppo ritmico, e cioè estrae un numero a caso q tale che $0 \leqslant q < 1$ e determina il primo numero n per cui risulta:

$$q < q_1 + q_2 + \ldots + q_n \tag{6.4}$$

La presente formulazione dei gruppi ritmici e melodici permette facilmente di modificarli dal quadro di comando della macchina senza problemi di tempo o memoria-macchina (ed è un perfezionamento della versione presentata in [126, 127]).

6.3 *Strutture del periodo musicale*

Per precisare matematicamente la struttura ritmica, la struttura melodica, e quella armonica, è necessario anzitutto precisare in modo più formalizzato di quanto è fatto nelle teorie della musica la cosiddetta struttura "intervallare". Per questa struttura (come pure per le altre) prenderemo in considerazione alcune varianti tra le più diffuse nella musica.

1. Suddividiamo la lunghezza di un "periodo" di 8 battute in due "proposizioni" di 4 battute, e ogni proposizione in "frasi" di 1 o 2 o 4 battute. Le "frasi" invece di iniziare al principio di una battuta (cioè con una nota "in battere") possono presentare anzitutto una "anacrusi" cioè alcune note ("in levare") alla fine della battuta precedente. Il significato musicale di queste note obbliga ad includerle nella frase successiva; in altre parole per evitare algoritmi poco fruttuosi è ragionevole rinunciare alla pretesa che l'inizio e la fine delle frasi coincidano sempre con le sbarre verticali che separano le battute. Per motivi di semplicità conveniamo che tutte le "frasi" di un "periodo" abbiano lo stesso tipo di anacrusi. Ne segue che i confini tra le frasi si ottengono dai confini tra le battute con una rigida traslazione e quindi rimane vero che la lunghezza di ogni frase è sempre esattamente uguale ad un numero intero di battute. Negli esempi 6 e 16 dell'Appendice 2 è mostrato come si scompongono le melodie con o senza anacrusi.

Diremo *struttura intervallare SI* uno schema di suddivisione del periodo di 8 battute in frasi di ciascuna delle quali viene indicata la lunghezza misurata in

battute:

$$SI: j_1 + j_2 + \ldots + j_k \; (= 8) \tag{6.5}$$

Nel nostro programma vengono usate le seguenti quattro strutture intervallari che nella teoria della musica hanno rispettivamente i nomi:

SI_1 : 2+2+4 = struttura di addizionamento
SI_2 : 2+2+1+1+2 = struttura di frazionamento con epilogo
SI_3 : 1+1+2+1+1+2 = struttura di addizionamento ripetuto
SI_4 : 2+2+2+2 = struttura quadrata

Riportiamo qui i numeri delle prime 20 melodie contenute nell'Appendice 2 in corrispondenza delle loro strutture intervallari:

SI_1 per le melodie n. 1, 5, 15, 17, 18
SI_2 per le melodie n. 12, 13, 14, 16
SI_3 per le melodie n. 2, 6, 8, 11, 19
SI_4 per le melodie n. 3, 4, 7, 9, 10, 20

2. Diremo *struttura ritmica* del periodo musicale di 8 battute una successione di 4 numeri:

$$SR = \rho_1 \; \rho_2 \; \rho_3 \; \rho_4 \tag{6.6}$$

dove ogni numero si riferisce ad una coppia di battute, e numeri uguali indicano ripetizione del ritmo.
Nel nostro programma vengono usate le seguenti quattro strutture ritmiche:

$$\begin{aligned} SR_1 &= 1 \;\; 1 \;\; 1 \;\; 1 \\ SR_2 &= 1 \;\; 1 \;\; 2 \;\; 2 \\ SR_3 &= 1 \;\; 2 \;\; 1 \;\; 2 \\ SR_4 &= 1 \;\; 2 \;\; 2 \;\; 1 \end{aligned} \tag{6.6'}$$

Ad esempio $SR_4 = 1\ 2\ 2\ 1$ indica che l'ultima coppia di battute (cioè la settima

e l'ottava battuta) ripete il ritmo del tratto musicale che occupa la prima coppia (cioè le prime due battute), mentre la penultima coppia (cioè la quinta e la sesta battuta) ripete il ritmo del tratto che occupa la seconda coppia (cioè la terza e quarta battuta).
È superfluo avvertire che i numeri in (6.6′) *non* si riferiscono a ritmi fissati ma unicamente prescrivono le ripetizioni. In altre parole nelle varie melodie di 8 battute che si compongono anche senza cambiare la struttura ritmica SR_i e anche senza cambiare il gruppo ritmico (6.1) le estrazioni casuali con l'algoritmo (6.2) forniscono una varietà di ritmi generalmente diversi.
Inoltre nella maggioranza dei casi la ripetizione del ritmo non si estende a tutto il tratto di due battute a causa di una incipiente anacrusi o di altre eventualità che impongono altri ritmi.
Riportiamo qui i numeri delle prime 20 melodie contenute nell'Appendice 2 in corrispondenza delle loro strutture ritmiche:

SR_1 per le melodie n. 2, 8, 11
SR_2 per le melodie n. 5, 6, 10, 13, 16, 18
SR_3 per le melodie n. 4, 14, 15, 19
SR_4 per le melodie n. 1, 3, 7, 9, 12, 17, 20

3. Diremo *struttura melodica* del periodo musicale di 8 battute una successione di 8 numeri:

(6.7) $$SM = m_1\ m_2 \ldots m_8$$

dove ogni numero si riferisce ad una battuta, e numeri uguali indicano ripetizione della linea melodica cioè ripetizione degli intervalli tra note successive. Nel nostro programma vengono usate le seguenti sei strutture melodiche:

$$SM_1 = 1\ 1\ 1\ 1\ 2\ 2\ 3\ 3$$
$$SM_2 = 1\ 2\ 1\ 2\ 3\ 3\ 3\ 4$$
$$SM_3 = 1\ 2\ 3\ 4\ 1\ 2\ 3\ 4$$
$$SM_4 = 1\ 1\ 2\ 2\ 3\ 3\ 1\ 1$$
$$SM_5 = 1\ 2\ 3\ 4\ 3\ 5\ 1\ 2$$
$$SM_6 = 1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 5\ 3\ 3$$

Ad esempio $SM_4 = 1\ 1\ 2\ 2\ 3\ 3\ 1\ 1$ indica che devono essere composte tre diverse configurazioni melodiche (cioè successioni di intervalli con certe ampiezze) una delle quali va applicata alla prima, seconda, settima e ottava battuta, un'altra alla terza e alla quarta battuta, e un'altra ancora alla quinta e alla sesta battuta.
Va osservato che due battute che ripetono la stessa linea melodica anche se hanno lo stesso ritmo *non* necessariamente ripetono le stesse note, perché la linea melodica vincola soltanto gli intervalli φ (ampiezza e segno) tra due note successive, e dunque partendo da una nota diversa si viene ad avere un motivo "traslato" verso destra o verso sinistra sulla tastiera del pianoforte. Quando poi il ritmo è diverso la ripetizione della linea melodica di solito rimane limitata ad una prima porzione (quando è diverso il numero delle note).
Riportiamo qui i numeri delle prime 20 melodie contenute nell'Appendice 2 in corrispondenza delle loro strutture melodiche:

SM_1 per le melodie n. 2, 5, 6, 8, 10, 13, 18
SM_2 per le melodie n. 16
SM_3 per le melodie n. 4, 11, 14, 15, 19
SM_4 per le melodie n. 1, 3, 12, 17,
SM_5 per le melodie n. 7, 9, 20

4. Prima di definire la struttura armonica dobbiamo introdurre il concetto di *nota di sostegno*: come preciseremo, si tratta di attribuire ad alcune note della melodia il compito di collegarla ad un accordo di accompagnamento che pur non venendo suonato rimane implicito nella melodia per la durata di una battuta e la inquadra in uno sviluppo armonico delle successive battute.
Nel nostro programma si possono scegliere le note di sostegno nei seguenti quattro modi:

a) Si considera *nota di sostegno* la prima nota di ogni battuta.
b) Si considera *nota di sostegno* la prima nota di ogni quarta parte di battuta, se in tale posizione non è prolungato il suono della nota precedente.
c) Si considera *nota di sostegno* la prima nota di ogni mezza battuta, se in tale posizione non è prolungato il suono della nota precedente.
d) Tutte le note della melodia sono *note di sostegno*.

Consideriamo ora gli A-accordi definiti nel punto 10 della sezione 5.1. Il programma descritto in questo capitolo ammette 3 valori del codice A e cioè: $A = 1$ = accordo di tonica, $A = 4$ = accordo di sottodominante, $A = 5$ = accordo di dominante.
Diremo che una battuta è *A-determinata* oppure che la *funzione armonica* della battuta *corrisponde al codice A*, se le *note di sostegno* di questa battuta appartengono all'accordo A.
Diremo *struttura armonica SA* del periodo musicale di 8 battute una successione di 8 numeri:

$$SA = a_1\ a_2\ \ldots\ a_8 \tag{6.8}$$

dove ogni numero si riferisce ad una battuta e ne prescrive la funzione armonica.
Nel nostro programma vengono usate le seguenti quattro strutture armoniche:

$$\begin{aligned}
SA_1 &= 1\ \ 1\ \ 4\ \ 5\ \ 4\ \ 4\ \ 5\ \ 1\\
SA_2 &= 1\ \ 5\ \ 1\ \ 5\ \ 4\ \ 4\ \ 5\ \ 1\\
SA_3 &= 1\ \ 4\ \ 4\ \ 4\ \ 1\ \ 4\ \ 4\ \ 1\\
SA_4 &= 1\ \ 4\ \ 1\ \ 5\ \ 4\ \ 1\ \ 5\ \ 1
\end{aligned}$$

La funzione armonica di una battuta conferisce alle note di sostegno (che appartengono all'accordo) una maggiore stabilità (relativamente a quell'accordo); passando poi da una battuta all'altra le successive diverse funzioni armoniche conferiscono alla melodia un significato musicale che rende facile (non solo suonarla su uno strumento ma anche) cantarla. Di questo ci si può convincere confrontando le melodie riportate all'Appendice 2 con quelle per la composizione delle quali non era prevista la funzione armonica, come quelle in Fig. 32 (v. [126, 127]).

Riportiamo qui i numeri delle prime 20 melodie contenute nell'Appendice 2 in corrispondenza delle loro strutture armoniche:

SA_1 per le melodie n. 5, 9, 10, 11, 12, 15, 18
SA_2 per le melodie n. 1, 2, 3, 6, 13

SA_3 per le melodie n. 16, 17, 19
SA_4 per le melodie n. 4, 7, 8, 14, 20

5. Come complemento delle strutture precedentemente illustrate considereremo anche la *struttura della distanza SD*. Essa consiste nel precisare le distanze tra il principio del periodo e gli inizi delle frasi, che in presenza di anacrusi rimangono anticipati rispetto agli inizi delle battute.

6.4 *Calcolo della melodia*

Il processo di costruzione della melodia è costituito da tre tappe consecutive: (I) costruzione della struttura generale; (II) determinazione del ritmo cioè delle durate di tutte le note; (III) scelta delle altezze delle note. Nella presente sezione si descrivono i principi di organizzazione dei vari elementi della melodia e le più importanti norme compositive incluse nel programma.
(I). Nella prima tappa avviene la scelta (casuale oppure data dal quadro comandi) di una delle possibili varianti per ogni struttura: *SI, SR, SM* (v. sezione 6.3) in modo da poter giungere, nelle tappe seguenti, a comporre le frasi che generano e ripetono configurazioni ritmiche e melodiche.
(II). Nella seconda tappa avviene la composizione del ritmo di tutto il periodo:

1. Le durate σ delle note si scelgono (per mezzo del generatore di numeri casuali, applicando ripetutamente l'algoritmo (6.2)) in modo da rispettare le probabilità prescritte dal gruppo ritmico R_i che è stato fissato nella tappa iniziale. Il ritmo si costruisce battuta per battuta (anche se la struttura ritmica (6.6) si riferisce alle coppie di battute); la scelta delle successive combinazioni di durate σ^* si arresta quando complessivamente si raggiunge (o si supera) la durata di una battuta, e se questa viene superata allora l'ultima combinazione σ^* viene subito sostituita con una più breve (perché non sono ammesse *legature* attraverso i tratti verticali che separano le battute).
2. L'algoritmo di scelta delle durate viene omesso per quelle (coppie di) battute che in base alla struttura ritmica adottata devono ripetere i ritmi di battute precedenti.

3. In base alla suddivisione del periodo musicale in frasi determinata dalla struttura intervallare si individuano quegli inizi di battuta cui va premessa (nell'ultima porzione della battuta precedente) l'anacrusi. Come si è detto per tutte le frasi del periodo si sceglie una stessa configurazione ritmica dell'anacrusi, che può essere una delle seguenti quattro:

(6.10) $\sigma_\alpha^* =$, $\sigma_\alpha^* =$, $\sigma_\alpha^* =$, $\sigma_\alpha^* = 0$

dove $\sigma_\alpha^* = 0$ significa che le frasi iniziano con l'inizio di una battuta.

4. Le note di lunga durata, creando una pausa ritmica, devono essere controllate: sono ad esempio benvenute alla fine delle frasi e non devono comparire altre note di maggiore durata in posizioni inopportune. Ad esempio la durata dell'ultima nota di una frase non deve superare quella dell'ultima nota di tutto il periodo.

5. Tutte le informazioni strutturali sul periodo che deve essere composto si possono inquadrare in una matrice:

(6.11)
$$S = \left\| \begin{array}{ccccc} i_1 & d_1 & r_1 & m_1 & a_1 \\ i_2 & d_2 & r_2 & m_2 & a_2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ i_8 & d_8 & r_8 & m_8 & a_8 \end{array} \right\|$$

le cui 8 righe corrispondono alle 8 battute e le cui 5 colonne corrispondono rispettivamente alla struttura intervallare, della distanza, ritmica, melodica, armonica come vogliamo ora descrivere.

Si tratta di tradurre le informazioni su queste strutture, considerate nella sezione precedente, in un linguaggio matematico più immediatamente vicino al calcolo che la macchina deve eseguire. Esaminiamo separatamente queste cinque strutture:

Per quanto riguarda la struttura intervallare SI assegnata dalla decomposizione (6.5) consideriamo gli intervalli

$$I_1\ I_2 \ldots I_K$$

di lunghezza rispettivamente $j_1\ j_2 \ldots j_k$ (misurata in battute) nei quali il

periodo musicale risulta suddiviso (e che in assenza di anacrusi coincidono con le frasi). La prima colonna di (6.11) si ottiene assumendo:

$$\left\{\begin{array}{l} i_n = 1 \text{ se con l'}n\text{-esima battuta inizia} \\ \qquad \text{uno degli intervalli } I_1 \ldots I_k \\ \text{altrimenti } i_n = 0 \end{array}\right\} \tag{6.12}$$

Vediamo due esempi:
Per la struttura intervallare 1 + 1 + 2 + 4 la prima colonna di (6.11) diventa: 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0.
Per la struttura intervallare 2 + 2 + 4 la prima colonna di (6.11) diventa 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0.
Per quanto riguarda la struttura della distanza SD, la seconda colonna di (6.11) *in assenza di anacrusi* è costituita dai numeri:

$$\delta_1 = 1,\ \delta_2 = 5,\ \delta_3 = 9,\ \delta_4 = 13,\ \delta_5 = 17,\ \delta_6 = 21,\ \delta_7 = 25,\ \delta_8 = 29$$

che, assumendo come unità di misura una semiminima cioè un quarto di battuta, servono per indicare la posizione delle prime note di ogni battuta; *se invece si ha una anacrusi* allora indicando con α il minimo intero che ne contiene la durata, la seconda colonna di (6.11) è data da:

$$d_n = \delta_n - i_n\alpha \tag{6.13}$$

cioè in corrispondenza delle battute con $i_n = 1$ (dove iniziano gli intervalli) l'inizio delle frasi viene anticipato di α.
Ad esempio per la struttura intervallare 2 + 2 + 4 con una anacrusi di lunghezza $\alpha = 1$ la seconda colonna di (6.11) diventa costituita dai numeri

$$0,\ 5,\ 8,\ 13,\ 16,\ 21,\ 25,\ 29$$

che in base 8 si scrivono

$$0,\ 5,\ 10,\ 15,\ 20,\ 25,\ 31,\ 35.$$

Per quanto riguarda la struttura ritmica SR codificata con i quattro numeri (6.6) ognuno dei quali si riferisce ad una *coppia* di battute, poniamo nella terza colonna di (6.11) gli otto numeri che così si ottengono:

$$(\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4) \to (\rho_1, 0, \rho_2, 0, \rho_3, 0, \rho_4, 0) \tag{6.14}$$

Infine per la struttura melodica *SM* la quarta colonna di (6.11) è costituita dai numeri

$$m_n \tag{6.15}$$

già definiti nella (6.7), e per la struttura armonica *SA* la quinta colonna di (6.11) è costituita dai numeri

$$a_n \tag{6.16}$$

già definiti nella (6.8).
Ad esempio per le melodie n. 5 e n. 18 dell'Appendice 2 sono state scelte le strutture

$$\begin{aligned}
SI &= 2 + 2 + 4 \\
SR &= 1 \quad 1 \quad 2 \quad 2 \\
SM &= 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 2 \quad 2 \quad 3 \quad 3 \\
SA &= 1 \quad 1 \quad 4 \quad 5 \quad 4 \quad 4 \quad 5 \quad 1 \\
\alpha \text{ (anacrusi)} &= 1
\end{aligned}$$

e dunque la matrice (6.11) si scrive (coi numeri in base 8 che abbiamo ora già considerato):

$$S = \left\| \begin{array}{ccccc} 1 & 00 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 05 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 10 & 1 & 1 & 4 \\ 0 & 15 & 0 & 1 & 5 \\ 1 & 20 & 2 & 2 & 4 \\ 0 & 25 & 0 & 2 & 4 \\ 0 & 31 & 2 & 3 & 5 \\ 0 & 35 & 0 & 3 & 1 \end{array} \right\|$$

Esaminiamo ora il procedimento per costruire il ritmo del periodo musicale, in base alla struttura ritmica codificata nella terza colonna della matrice (6.11), alla lunghezza α dell'anacrusi, e al gruppo ritmico (6.1). Per ogni coppia di battute la struttura ritmica indica se si deve far uso del gruppo ritmico per estrarre nuove combinazioni di durata di note o se invece si deve ripetere il ritmo di una precedente coppia di battute. Inoltre in ogni caso bisogna arrestare il procedimento per lasciare il posto per una eventuale anacrusi (di lunghezza α) della frase successiva; immediatamente prima di ciò si ha l'*ultima nota della frase* la cui durata verrà indicata con

(6.18) β

e dunque le altre note in una battuta hanno durata complessiva (misurata in quarti di battuta)

$$\left\{ \begin{array}{ll} 4 - \beta - \alpha & \text{se la frase termina} \\ & \text{in questa battuta} \\ 4 & \text{altrimenti} \end{array} \right\} \tag{6.19}$$

(III) Nella terza tappa, che è la più importante come mole di lavoro e come significato, si scelgono le altezze delle note (e quindi anche gli intervalli tra note consecutive) in base alla struttura melodica codificata nella quarta colonna della matrice (6.11), al gruppo melodico (6.3), e alla struttura armonica codificata nella quinta colonna di (6.11).

1. A partire da una altezza W_0 scelta a caso (e che non verrà inclusa nella composizione) le altezze delle note successive vengono determinate aggiungendo via via nuovi intervalli φ mediante l'operatore (+) definito nella sezione 5.2:

$$W_n = W_{n-1} \; (+) \; \varphi_{n-1} \tag{6.20}$$

2. Il *valore assoluto* dell'intervallo φ si estrae ad ogni passo in base al gruppo melodico (6.3). La scelta del *segno* di φ (positivo = movimento verso una nota più acuta; negativo = movimento verso note più basse) ha un ruolo molto importante:

3. Anzitutto si può osservare che i cambiamenti di segno dei successivi intervalli φ non devono essere né troppo frequenti (perché darebbero luogo ad una sgradevole linea melodica a "zig-zag") né troppo rari (perché si avrebbe una poco interessante linea di molte note sempre più acute o sempre più basse). Si può inoltre osservare che nelle melodie gradevoli di solito *dopo* un intervallo molto ampio si ha un intervallo di segno opposto (che "riempie il salto" come descritto nella sezione 2.2 punto 2).

4. Vogliamo ora descrivere un algoritmo che permette di regolare automaticamente il segno dei successivi intervalli φ in modo da soddisfare in senso probabilistico (cioè nella maggioranza dei casi) tutti i requisiti esposti nel punto precedente.

Dal quadro di comando viene trasmesso il valore di un numero intero N. Se questo valore non viene trasmesso la macchina assume $N = 3$. Durante la composizione non verranno mai scelti più di N intervalli φ consecutivi con lo stesso segno, cioè non ci saranno più di N note consecutive che si muovono nello stesso verso; ma questo naturalmente non è tutto. Per seguire la logica dell'algoritmo che ora descriveremo occorre tener presente che quando si estrae un possibile valore dell'intervallo φ_{n-1}, la conseguente nota W_n data dalla (6.20) non sempre risulta accettabile: ad esempio essa potrebbe cadere fuori della gamma della voce umana o dello strumento col quale si vuole poter suonare la melodia; un altro motivo che può rendere inaccettabile un intervallo φ_{n-1} è il seguente: sono proibiti due intervalli consecutivi $\varphi_{n-2}\,\varphi_{n-1}$ che complessivamente supererebbero l'ampiezza di una ottava: $|\varphi_{n-2} + \varphi_{n-1}| > 7$. Dunque la macchina, quando *tenta* un valore possibile di φ_{n-1} non sempre lo trova poi

accettabile. Supponiamo ora che la macchina abbia composto N note sempre più basse cioè giungendovi con intervalli negativi, e allora necessariamente deve invertire il verso della linea melodica muovendosi con intervalli positivi: al massimo N volte, ma più precisamente l'algoritmo le impone ora di compiere *soltanto N tentativi* di intervalli positivi, i quali N tentativi, come si è chiarito, non sempre corrispondono ad N effettivi passi verso note via via più acute. È facile comprendere che se uno di questi passi effettivamente compiuto risulta piuttosto ampio, allora con grande probabilità molti ulteriori intervalli positivi "tentati" successivamente risultano inaccettabili per i motivi detti, e dunque giunge ben presto la scadenza che obbliga automaticamente a cambiare segno per i futuri intervalli; se invece i passi successivi in un stesso verso risultano poco ampi allora è più probabile che il loro numero sia più grande (ma sempre al massimo N).

5. L'intervallo di *tritono* (cioè di 6 semitoni, come si - fa) viene di solito proibito, ed è permesso solo nel caso di una successiva "risolvenza" (= passaggio ad una nota vicina che appartiene all'accordo). Analoga limitazione è prevista nel caso in cui la somma di due intervalli consecutivi risulti uguale ad un intervallo "di settima" (come l'intervallo di undici semitoni da do a si).

6. Ritornando a descrivere l'inizio della III tappa notiamo che la macchina, dopo la costruzione del ritmo, attribuisce a determinate note della melodia il carattere *NS* di *nota di sostegno*. Quattro criteri per scegliere le note di sostegno sono stati descritti nel punto 4 della sezione 6.3; se dal quadro di comando non viene trasmesso quale è il criterio da seguire, la macchina sceglie il terzo. Fanno eccezione, in ogni caso, le note dell'anacrusi e le penultime note di ogni frase, alle quali il carattere *NS* non va attribuito.
Nella sezione 6.3 è stato descritto l'obbligo che le note di sostegno hanno di appartenere all'accordo che costituisce la funzione armonica della battuta (in base alla struttura armonica). Ne segue, ovviamente, che nel caso delle note di sostegno la scelta dell'altezza col procedimento descritto nella presente sezione non può essere effettuata liberamente ma deve essere adattata a questo ulteriore vincolo.
Il fatto che W_n (cioè la nota n-esima) è una nota di sostegno verrà indicato scrivendo:

(6.21) $$n \in NS$$

7. I seguenti possibili vincoli per le note delle anacrusi permettono di ottenere una varietà di caratteri emozionali dell'inizio delle frasi.
Il carattere *NSA* (nota di sostegno dell'anacrusi) si attribuisce o a tutte le note dell'anacrusi o alla sua ultima nota. Se la nota W_n ha tale carattere scriveremo:

(6.22) $$n \in NSA$$

L'anacrusi, che strutturalmente è legata alla battuta successiva, può essere vincolata alla funzione armonica A di questa battuta in due modi diversi: imponendo che le note di sostegno dell'anacrusi appartengano

(6.23)
$$\left\{\begin{array}{l} \text{all'accordo } A = \text{ funzione armonica della battuta successiva} \\ \textit{oppure} \\ \text{ad un } \textit{altro} \text{ degli accordi che costituiscono funzioni armoniche} \end{array}\right\}$$

Il segno degli intervalli φ_n da usare dopo una nota W_n di sostegno dell'anacrusi viene assegnato con un valore X:

(6.24) $$\text{se } n \in NSA \text{ allora } \operatorname{sign} \varphi_n = \operatorname{sign} X$$

e deve essere $\varphi_n \neq 0$:

(6.25) $$\text{se } n \in NSA \text{ allora } W_{n+1} \neq W_n$$

8. Nel nostro programma tutte le note della melodia devono rimanere nella gamma (v. codificazione al punto 5 della sezione 5.1):

$$\min W = 13 \leqslant W \leqslant \max W = 36$$

cioè tra il mi dell'ottava $\theta = 1$ (a sinistra del do centrale) e il la dell'ottava $\theta = 3$.

Dal quadro comandi questi limiti possono essere modificati, oppure può essere prescritta l'ampiezza

(6.26) $$\max W \ (-) \ \min W$$

Può inoltre essere prescritta l'ampiezza ψ della "gamma locale" entro la quale gamma (variabile) deve trovarsi ogni tratto di $k + 1$ note successive:

(6.27) $$|W_{n+h} \ (-) \ W_n| \leqslant \psi \quad \text{per } |h| \leqslant k$$

Questo vincolo può essere usato ad esempio per impedire due ampi intervalli (salti) successivi nello stesso verso. È anche possibile stabilire una gamma diversa per ogni battuta, ad esempio permettendo note più acute solamente nella sesta battuta (v. sezione 2.2 punto 5).

9. È già stato segnalato il ruolo del "salto" (e del suo "riempimento", v. sezione 2.2 punto 2) che ora possiamo definire con le ampiezze:

$$|W_n \ (-) \ W_{n-1}| \geqslant 4 \quad \text{oppure} \quad |W_n \ (-) \ W_{n-2}| \geqslant 5$$

Come già segnalato nel punto 5 della sezione 2.2 si distinguono due tipi opposti di salto:

(6.28)
Sal_1 : da una nota debole e breve ad una accentata
Sal_2 : da una nota forte ad una non accentata;

Regolando diversamente i salti nell'anacrusi si può avere un carattere più deciso (Sal_1) o più melodioso (Sal_2).

10. Un salto semplice o doppio (= due salti consecutivi nello stesso verso) può essere "riempito" da una certa quantità di note che si muovono tutte nel verso contrario oppure anche alternando i versi ma con prevalenza del verso contrario a quello del salto, e sempre con intervalli di ampiezza piccola (0, 1, talvolta 2).

11. Come osservato nel punto 3 della sezione 6.3 le "traslazioni" di un motivo lungo la tastiera avvengono in conseguenza delle ripetizioni imposte dalla struttura melodica.

12. L'altezza delle ultime note di ogni frase è oggetto di vincoli particolari, in relazione alla funzione armonica *A* della battuta:
a) con terminazione sulla radice (v. sezione 5.1 punto 10)
b) con terminazione sulla terza o quinta
c) con terminazione (instabile, provvisoria) su altre note.

6.5 *Alcune particolarità del programma*

L'algoritmo descritto è stato tradotto in un programma per la macchina elettronica URAL-2. Le istruzioni del programma e i dati occupano complessivamente 2700 locazioni. La composizione di una melodia in 8 battute può richiedere un tempo variabile da 5 secondi ad 1 minuto.
Come si è detto il programma è scritto in modo da permettere che molte caratteristiche desiderate nella composizione (in un grandissimo numero di combinazioni possibili) vengano trasmesse dal terminale di comando sotto forma di valori assegnati a certi parametri. Si è anche detto che per ciascuno di quei parametri i cui valori non vengono trasmessi, la macchina estrae a caso uno dei valori ammessi e quando poi stampa la musica stampa anche i valori adottati di tutti i parametri per facilitare il controllo umano.
Altre caratteristiche desiderate nella melodia non potrebbero convenientemente essere inserite in questo modo alla base delle strutture usate nella composizione, trattandosi di caratteristiche più complesse di cui è preferibile accertare la presenza dopo che la melodia è stata composta. Ebbene anche questa possibilità è offerta dal programma: ad esempio i "salti" di un certo tipo "riempiti" in un certo modo possono venire imposti in questo nuovo modo: la macchina, dopo aver composto una melodia, controlla se la caratteristica desiderata è presente, e se non è presente riparte automaticamente tentando, con altre estrazioni casuali, un'altra composizione, finché giunge ad una melodia che soddisfa tutti i requisiti per essere stampata. È questo il motivo del tempo variabile di composizione segnalato all'inizio della presente sezione.
Va anche segnalato che nel programma è inserito un algoritmo per segnalare ed eliminare quei cicli di alcune note che riproporrebbero indefinitamente la loro ripetizione: se a causa di vincoli particolari risulta inaccettabile ogni altra

continuazione la macchina automaticamente riparte dall'inizio con altre scelte casuali.

6.6 *Schema a blocchi del programma*

Lo schema a blocchi del funzionamento della macchina (Fig. 47) e lo schema delle principali scelte trasmesse dal quadro di comando (Fig. 48) danno una idea delle fasi successive nelle quali i vari elementi musicali vengono scelti, adattati, e composti nel processo di costruzione della melodia. Ovviamente lo scopo di queste figure non è quello di illustrare tutti i calcoli descritti nelle sezioni precedenti.
Nella Fig. 47 i segni + e − si riferiscono alle scelte che la macchina effettua automaticamente quando si verifica o non si verifica una certa condizione; nella Fig. 48 invece i segni + e − si riferiscono alle principali decisioni dell'operatore (che consistono nell'inserire o nel togliere una parte dell'algoritmo).

Descriviamo brevemente anzitutto la Fig. 48. Il blocco S rappresenta la prima tappa e cioè la scelta di nuove strutture (e corrisponde al blocco 1 della Fig. 47). Il blocco R è la seconda tappa e cioè la composizione di un nuovo ritmo (dal blocco 2 al blocco 15 nella Fig. 47). Il blocco M è la terza tappa e cioè la composizione delle altezze che determinano le note (da 16 a 59 nella Fig. 47). Se poi viene inserito il blocco al centro dell'ultima colonna la melodia in do maggiore $\{W_n\}$ viene trasformata nella melodia $\{W_n' = W_n\,(-)\,2\}$ in la minore (e precisamente, attribuendo inoltre un diesis ad ogni sol, si ottiene una melodia nella scala minore armonica). In ogni caso si giunge, in fondo a destra, alla stampa della melodia sotto le codificazioni (5.3) e (5.4). Il processo può ripartire dalle fasi *S* oppure *R* oppure *M*.
Descriviamo ora la Fig. 47:
Blocco 1: Viene scelta (a caso, o secondo la decisione trasmessa dal quadro di comando) una delle varianti ammesse per la struttura intervallare *SI*, per la struttura ritmica *SR*, per la struttura melodica *SM*, per l'anacrusi, e conseguentemente per la struttura delle distanze *SD*.
Blocco 2: Viene scelto il gruppo ritmico (6.1) e la durata (6.18) dell'ultima nota di ogni frase.

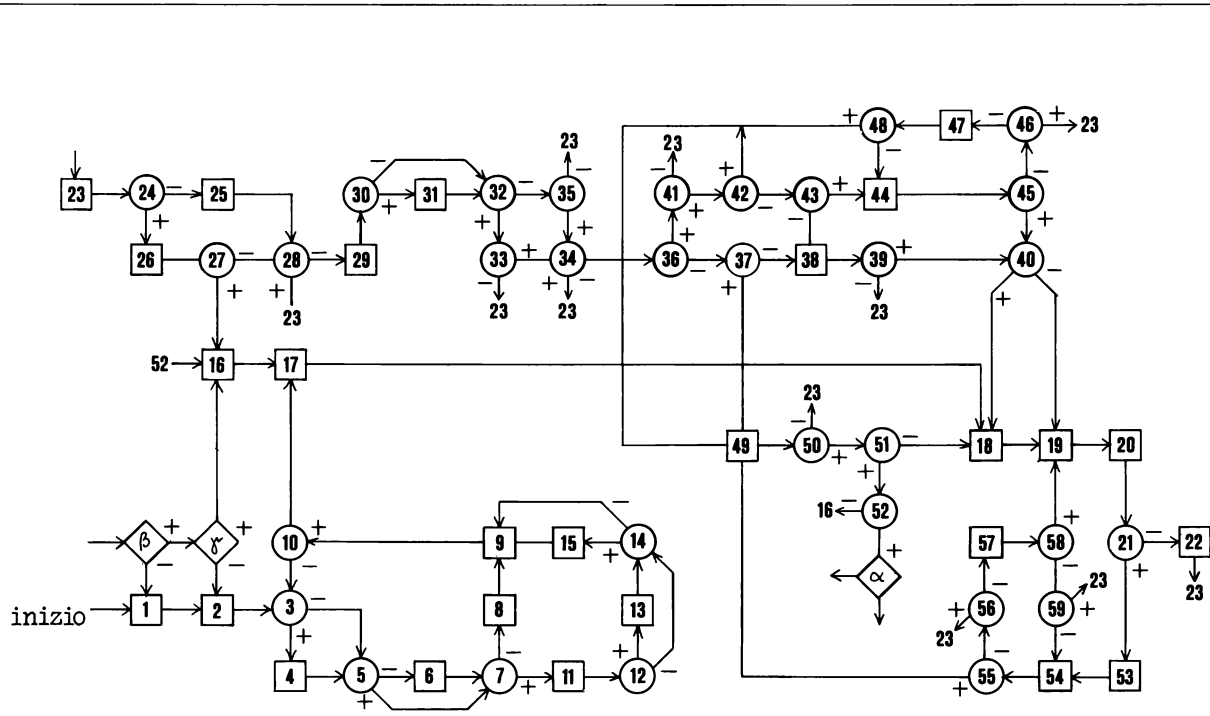


Fig. 47. Schema a blocchi del programma per la composizione della melodia.

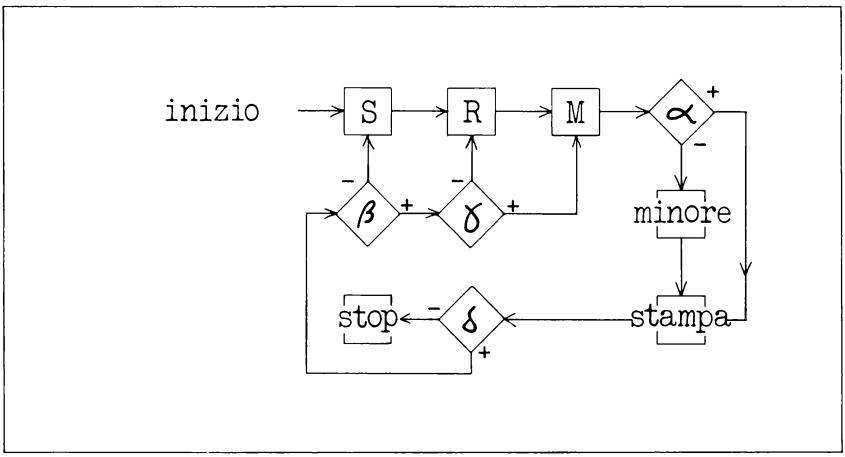


Fig. 48. Schema di inserimento delle principali parti dell'algoritmo.

I blocchi 3-15 vengono percorsi più volte, e costruiscono il ritmo delle varie battute.

Blocco 3 (rappresentato con un cerchio perché si tratta di una scelta logica): si esamina se è stato stabilito di iniziare le frasi con o senza anacrusi.

Blocco 4: Si includono nel ritmo le note dell'anacrusi.

Blocco 5 (scelta logica): Si esamina se in base alla struttura ritmica si deve attualmente ripetere un ritmo già costruito nelle battute precedenti oppure si deve costruire un ritmo nuovo.

Blocco 6: Si costruisce un ritmo mediante l'algoritmo (6.2).

Blocco 7 (scelta logica): Si esamina se per motivi di struttura intervallare (se cioè si devono costruire frasi di una battuta) o melodica (se cioè si deve ripetere in due battute la stessa linea melodica) è o non è richiesto considerare separatamente il ritmo delle singole (due) attuali battute.

Blocco 8: Si raccolgono le durate del ritmo costruito per la durata complessiva di due battute.

Blocco 9: Il ritmo attuale viene accettato, compatibilmente con la durata dell'anacrusi della frase successiva e con la durata dell'ultima nota della frase.

Blocco 10 (scelta logica): Si esamina se attualmente è già terminata la costruzione del ritmo di tutto il periodo musicale.
Blocco 11: Il ritmo attuale viene accettato limitatamente ad una battuta e tenendo conto della struttura della distanza.
Blocco 12 (scelta logica): Si esamina se si deve considerare l'anacrusi.
Blocco 13: Si includono nel ritmo le note dell'anacrusi.
Blocco 14 (scelta logica): Si esamina se la struttura melodica impone di ripetere in due battute la stessa linea e quindi lo stesso ritmo.
Blocco 15: Il ritmo viene modificato in base ai vincoli di ripetizione.
Blocco 16: Il ritmo della melodia precedente viene accettato per comporre una nuova melodia.
Blocco 17: Viene scelta (a caso, o secondo la decisione trasmessa dal quadro di comando) una delle varianti ammesse per la struttura armonica *SA*, il gruppo melodico (6.3), l'attribuzione del carattere di nota di sostegno (*NS* e *NSA*), la gamma dei suoni ammessi, il tipo (6.28) di salto consentito, ecc. Nei blocchi 18-59 avviene la scelta delle altezze che individuano le note dell'attuale battuta.
Blocco 18: Si attribuisce il carattere *NSA* alle note di sostegno dell'anacrusi.
Blocco 19: Si determina la gamma (locale) dei suoni ammessi nell'attuale battuta.
Blocco 20: Si determina per l'attuale battuta, la lunghezza del motivo da costruire, tenendo conto dell'anacrusi o della fine della battuta.
Blocco 21 (scelta logica): Si considera se in base alla struttura melodica si deve attualmente ripetere la linea melodica di una battuta precedente oppure si deve costruirne una nuova. (In quest'ultimo caso la costruzione avviene nei blocchi 22-39).
Blocco 22: Inizia la costruzione melodica della battuta attuale.
Nei blocchi 23-39 avviene la scelta dell'altezza di una nota.
Blocco 23: Si sceglie il valore assoluto di φ (cioè l'ampiezza ma non ancora il verso dell'intervallo tra la nota precedente e quella da costruire) in base al gruppo melodico (6.3).
Blocco 24 (scelta logica): Si esamina se la nota precedente ha il carattere *NSA* (nota di sostegno dell'anacrusi).
Blocco 25: Si determina il segno di φ mediante l'algoritmo di autoregolazione descritto nel punto (III)-4 della sezione 6.4.

Blocco 26: Si determina il segno di φ in base al vincolo *NSA* della nota precedente.
Blocco 27 (scelta logica): Si esamina se nella situazione attuale (dovuta alle note precedenti) è impossibile soddisfare a tutte le condizioni che vincolano la scelta del segno di φ.
Blocco 28 (scelta logica): Si esamina se la nuova nota uscirebbe dalla gamma consentita.
Blocco 29: In caso di carattere *NSA* si determina la funzione armonica (6.23).
Blocco 30 (scelta logica): Si esamina se l'attuale nota è una nota di sostegno.
Blocco 31: L'altezza della nota viene modificata scegliendo la nota più vicina che appartiene all'A-accordo dell'attuale funzione armonica.
Blocco 32 (scelta logica): Si esamina se la nota precedente ha il carattere *NSA*.
Blocco 33 (scelta logica): Si esamina se la condizione (6.25) è soddisfatta.
Blocco 34 (scelta logica): Si esamina se l'intervallo tra la nota precedente e la nota attuale è un *tritono*.
Blocco 35 (scelta logica): Si esamina se la condizione (6.27) è soddisfatta.
Blocco 36 (scelta logica): Si esamina se l'attuale intervallo è ampio, cioè costituisce un "salto".
Blocco 37 (scelta logica): Si esamina se la nota attuale è la penultima nota di una frase.
Blocco 38: La nota attualmente in considerazione viene accettata.
Blocco 39 (scelta logica): Si esamina se la frase attualmente in costruzione è terminata.
Blocco 40 (scelta logica): Si esamina se nella battuta attuale è prevista l'anacrusi della frase successiva (e si passa a costruire la frase o battuta successiva).
Blocco 41 (scelta logica): Si esamina se il tipo (6.28) del salto è quello che si è consentito.
Blocco 42 (scelta logica): Si esamina se la presente nota è la penultima nota di una frase.
Blocco 43 (scelta logica): Si esamina se il salto richiede di essere (possibilmente) "riempito" (cioè se le note saltate non comparivano precedentemente nella melodia).
Blocco 44: La nota attualmente in considerazione viene accettata (anche se finora il salto non è stato riempito).

Blocco 45 (scelta logica): Si esamina se la frase attualmente in costruzione è terminata.
Blocco 46 (scelta logica): Si esamina se il salto è stato riempito.
Blocco 47: L'intervallo φ viene scelto in modo da ottenere note che riempiano il salto.
Blocco 48 (scelta logica): Si esamina se la nota attuale è la penultima nota di una frase.
I blocchi 49-51 terminano la costruzione della frase.
Blocco 49: Le altezze della penultima (*WPF*) e dell'ultima (*WUF*) nota della frase vengono scelte in base alla struttura armonica, e al tipo che si è fissato per la "terminazione" (v. punto 12 della sezione 6.4).
Blocco 50 (scelta logica): Si esamina se le note *WPF* e *WUF*, provvisoriamente accettate, sono nei limiti della gamma consentita.
Blocco 51 (scelta logica): Si esamina se la costruzione del periodo musicale è terminata.
Blocco 52 (scelta logica): Si esamina se la melodia costruita soddisfa tutte le condizioni assegnate.
I blocchi 53-59 intervengono quando, in base alla struttura melodica, si deve ripetere una linea melodica costruita in una battuta precedente.
Blocco 53: Si individuano le note di cui bisogna ripetere la linea melodica, e l'ampiezza della "traslazione" da effettuare (per il fatto che di solito capita di partire da una nota diversa).
Blocco 54: Si determina l'altezza di una nota mediante la "traslazione" individuata nel blocco 53.
Blocco 55 (scelta logica): Si esamina se la nota attuale è la penultima nota di una frase.
Blocco 56 (scelta logica): Si esamina se la battuta attualmente in costruzione (con la ripetizione della linea melodica), avendo un ritmo diverso richiede la costruzione di ulteriori note.
Blocco 57: La nota attualmente in considerazione viene accettata.
Blocco 58 (scelta logica): Si esamina se, avendo terminato la battuta attuale, si deve passare alla costruzione della battuta successiva.
Blocco 59 (scelta logica): Si esamina se la nota attuale è la penultima nota di una frase.

Nell'Appendice 2 sono riportati 27 esempi di melodie composte dalla macchina elettronica URAL-2 secondo il programma descritto in questo capitolo. (Per due di queste melodie vengono anche riportati gli accompagnamenti ottenuti successivamente con altri programmi.)

7

Calcolo automatico del ritmo per comporre una canzone con versi assegnati

Descriviamo in questo capitolo un algoritmo che, assegnati alcuni versi di una poesia, permette alla macchina elettronica di calcolare il ritmo di una melodia che potrà essere poi composta (con l'algoritmo descritto nel capitolo precedente) ottenendo così una canzone con le parole dei versi assegnati.
Nell'Appendice 3 sono riportati alcuni esempi di canzoni ottenute con la macchina elettronica URAL-2 mediante questo procedimento.

7.1 *Ritmo dei versi, ritmo della canzone, ritmo della melodia*

Supponiamo che siano assegnati 4 versi di una poesia. Il *ritmo dei versi RV* viene trasmesso alla macchina indicando, per ogni verso, il *numero delle sillabe* precisando quali sillabe sono *accentate* e quali non lo sono.
In base all'algoritmo che vogliamo descrivere la macchina dovrà trovare, se è possibile, il *ritmo della canzone RC*, cioè dovrà suddividere il periodo di 8 battute in durate di note singole facendo corrispondere ad ogni sillaba una nota e tenendo conto delle sillabe accentate (nel modo che descriveremo).
In realtà nella maggior parte delle canzoni cantate si osserva che ad una stessa

sillaba possono corrispondere più note (cantate ripetendo la vocale); diremo che questo è il *ritmo della melodia RM*. Evidentemente, assegnato il ritmo dei versi *RV*, è possibile determinare varie versioni accettabili del ritmo della canzone *RC* ed una ancor più grande varietà di ritmi della melodia *RM* tutti accettabili per cantare i versi assegnati. È anche interessante considerare un ritmo di canzone *RC* (non necessariamente proveniente da un ritmo *RV*) e nella varietà di ritmi di melodia *RM* ad esso associabili effettuare una buona scelta basata sulle leggi del canto in relazione alle variazioni della melodia (cioè effettuando questa scelta simultaneamente con la costruzione della linea melodica). Per questi problemi, che non verranno trattati in questo libro, rimandiamo al libro [63]. Qui ci limitiamo a riportare nella Fig. 50 il ritmo *RC* (una nota per sillaba) di una canzone e nella Fig. 49 il ritmo *RM* (e la melodia) con cui si canta la canzone.

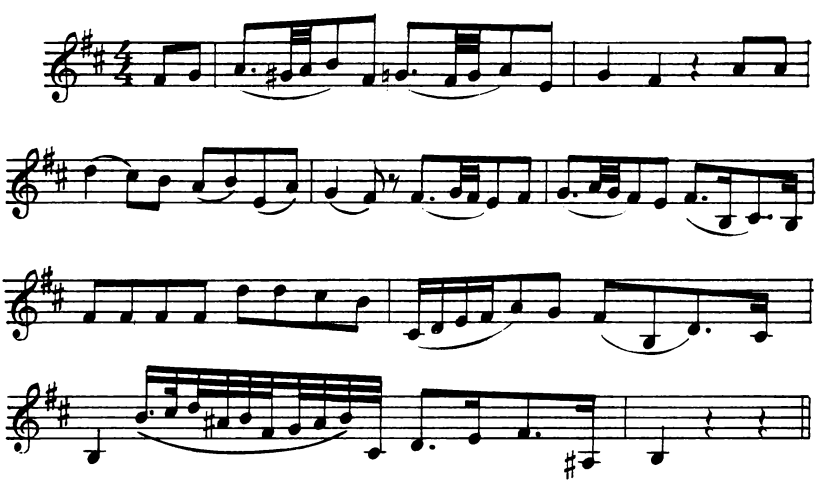


Fig. 49. Glinka: *Oh se lo avessi saputo prima.*

Per semplicità possiamo limitarci a comporre canzoni col ritmo RC, cioè che si cantano con una sillaba per nota, come ad esempio la canzone in Fig. 51.

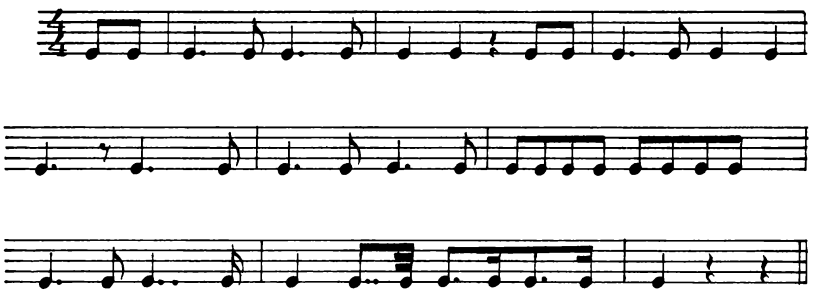


Fig. 50. Ritmo *RC* della canzone in Fig. 49.

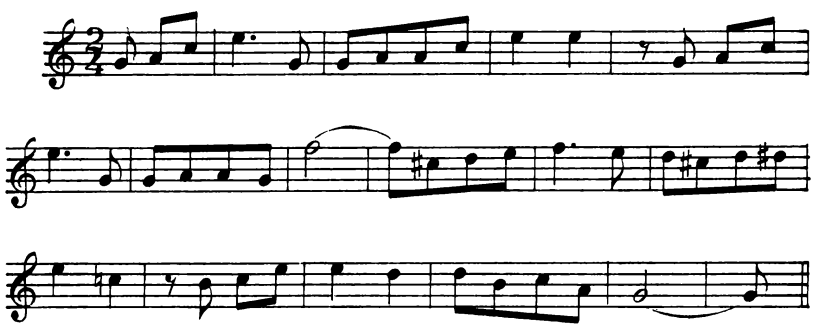


Fig. 51. Heit: *Tutti più in alto.*

Indichiamo con *PSR* la parte del programma descritto nel capitolo 6 per la determinazione delle Strutture e del Ritmo della composizione, e con *PM* la parte rimanente del programma, cioè quella che costruisce la linea Melodica sul ritmo già determinato; l'intero programma descritto nel capitolo 6 si può indicare con *PSRM*. Indicheremo con *PC* il programma preso in considerazione nel presente capitolo per determinare il ritmo *RC* sulla base del ritmo dei versi *RV* assegnato. Questo programma *PC* è scritto in modo da poter essere associato al programma *PM*: si viene così ad avere un programma *PCM* che, per un ritmo di versi *RV*, determina un ritmo di canzone *RC* e costruisce una linea melodica per cantare i versi assegnati.

Come il programma del capitolo precedente, anche il programma *PC* è scritto in modo da facilitare i cambiamenti dei valori di certi parametri che vengono trasmessi dal quadro comandi allo scopo di ottenere e paragonare diverse varianti che possono suggerire altre scelte future.

7.2 *Elementi fondamentali del ritmo*

Introduciamo i concetti fondamentali per il calcolo del ritmo.

1. Il ritmo RV della composizione in versi assegnata si presenta come l'insieme di quattro versi:

$$V_n \qquad n = 1, 2, 3, 4$$

ciascuno dei quali consiste in una successione di informazioni binarie, una per ogni sillaba, che indicano se la sillaba è accentata o non accentata.

2. Il ritmo RC della canzone (che sarà il risultato del presente programma *PC*) consiste nella suddivisione del periodo di otto battute in frasi di due (o quattro) battute, e delle battute in durate di singole note (una per ogni sillaba). Nel presente capitolo scegliamo per semplicità il tempo di 4/4; il modo di trasformare otto battute col tempo 4/4 in sedici battute col tempo 3/4 è stato segnalato nel punto 1 della sezione 6.2.

3. L'organizzazione delle durate delle note deve tener conto della struttura ritmica che regola le ripetizioni di configurazioni ritmiche (v. punto 2 della sezione 6.3).

4. Quando le norme che bisogna osservare lasciano una certa libertà di scelta tra alcune configurazioni ritmiche elementari, la macchina effettua questa scelta in base ad un numero fornito dal generatore di numeri pseudocasuali.

5. Ogni verso V_n, tenendo conto delle sillabe accentate e di quelle non accentate secondo schemi che verranno precisati in seguito, viene tradotto in una successione di durate di note per la lunghezza complessiva di due battute. Nella scelta di queste durate interviene il generatore di numeri pseudocasuali. Si controlla poi se certe regole sono soddisfatte, e se non lo sono allora vengono tentate altre scelte di durate. Come si vede facilmente il risultato *non* è

univocamente determinato dalla struttura del verso V_n (e quindi si possono avere vari ritmi per la stessa canzone).
6. Non tutte le regole devono sempre essere seguite: è possibile in ogni esperimento precisare dal quadro di comando quali regole possono essere trascurate e quali devono essere seguite, e in che modo.

7.3 *Codificazione degli elementi del ritmo*

1. In ogni verso V_n, ($n = 1, 2, 3, 4$), indichiamo con $\xi_1, \ldots, \xi_{s(n)}$ le sillabe, con *s(n)* il numero delle sillabe, con i segni $-$ e $\cup$ rispettivamente le sillabe accentate e non accentate, cui facciamo corrispondere rispettivamente i codici $\xi = 3$, $\xi = 1$.
2. Nell'ambito di un verso consideriamo i tratti composti da una (eventualmente mancante all'inizio del verso) sillaba accentata seguita da (nessuna o una o due) sillabe non accentate, e chiamiamo "combinazione elementare di sillabe" un tale tratto. Se ad esempio nel verso V_n si ha:

$$\ldots \xi_{i-1}\ \xi_i\ \xi_{i+1} \ldots \xi_{i+j}\ \xi_{i+j+1} \ldots$$

con:

$$\xi_i = 3,\ \xi_{i+1} = \xi_{i+2} = \ldots = \xi_{i+j} = 1,\ \xi_{i+j+1} = 3$$

allora:

$$\xi_i\ \xi_{i+1} \ldots \xi_{i+j},\ (0 \leqslant j \leqslant 2) \tag{7.1}$$

è una combinazione elementare di sillabe. Se essa si trova all'inizio del verso sarà $i = 1$, oppure anche $i = 0$ (cioè la sillaba accentata ξ_i può mancare). Se $j = 0$ la combinazione elementare si riduce alla sillaba accentata ξ_i. In ogni caso una combinazione elementare (se non è alla fine del verso) è seguita da un'altra combinazione elementare che inizia con una sillaba accentata.
La combinazione elementare (7.1) si codifica con il numero:

(7.2) $$\zeta = \xi_i + \xi_{i+1} + \ldots + \xi_{i+j}$$

Si può ora comprendere il motivo della scelta dei valori $\xi = 3$, $\xi = 1$ per le sillabe accentate o non accentate: i codici (7.2) delle combinazioni elementari ammesse dal programma risultano:

(7.3)

∪	$\zeta = 1$
∪ ∪	$\zeta = 1 + 1 = 2$
–	$\zeta = 3$
– ∪	$\zeta = 3 + 1 = 4$
– ∪ ∪	$\zeta = 3 + 1 + 1 = 5$

Come già avvertito le prime due di queste combinazioni sono ammesse solo all'inizio del verso.

3. È utile tener presente i concetti introdotti nella sezione 5.1 e in particolare quello di *combinazione di durate.*

4. Ad ogni combinazione elementare di sillabe di uno dei cinque tipi ammessi (7.3) facciamo corrispondere *una o più* combinazione di durate secondo il seguente elenco:

(7.3′)

∪	$(\zeta = 1)$	♩	$(\sigma_1 = 0)$
∪ ∪	$(\zeta = 2)$	♫	$(\sigma_2 = 0)$
–	$(\zeta = 3)$	♩	$(\sigma_3 = 0)$
–		𝅗𝅥	$(\sigma_3 = 1)$
–		𝅗𝅥.	$(\sigma_3 = 2)$
–		𝅝	$(\sigma_3 = 3)$
– ∪	$(\zeta = 4)$	♫	$(\sigma_4 = 0)$
– ∪		♩.♪	$(\sigma_4 = 1)$
– ∪		♩♩	$(\sigma_4 = 2)$
– ∪		𝅗𝅥♩	$(\sigma_4 = 3)$

− ∪				($\sigma_4 = 4$)
− ∪				($\sigma_4 = 5$)
− ∪				($\sigma_4 = 6$)
− ∪				($\sigma_4 = 7$)
− ∪	∪	($\zeta = 5$)		($\sigma_5 = 0$)
− ∪	∪			($\sigma_5 = 1$)
− ∪	∪			($\sigma_5 = 2$)
− ∪	∪			($\sigma_5 = 3$)

Come si vede è stato rispettato il principio che impone di far corrispondere una nota ad ogni sillaba. Per ognuno dei cinque tipi di combinazioni di sillabe le possibili corrispondenti combinazioni di durate sono state elencate in ordine non decrescente di durata complessiva: di conseguenza per ogni valore di ξ la lunghezza minima delle corrispondenti combinazioni di durate è quella che corrisponde al codice $\sigma = 0$.

5. Affinché ogni battuta inizi con una nota (e non con il prolungamento del suono dell'ultima nota della battuta precedente) ad ogni valore di σ (con $\xi = 3$, 4, 5) è associato nella seguente tabella un insieme di numeri che indicano i quarti di battuta ove è consentito iniziare la combinazione di durata σ (con garanzia di terminarla entro la stessa battuta e anche di evitare ritmi innaturali)

(7.3″)

$\sigma_3 = 0$	→	1, 2, 3, 4	$\sigma_4 = 4$ → 1
$\sigma_3 = 1$	→	1, 3	$\sigma_4 = 5$ → 1
$\sigma_3 = 2$	→	1	$\sigma_4 = 6$ → 1
$\sigma_3 = 3$	→	1	$\sigma_4 = 7$ → 1
$\sigma_4 = 0$	→	1, 2, 3, 4	$\sigma_5 = 0$ → 1, 3
$\sigma_4 = 1$	→	1, 2, 3	$\sigma_5 = 1$ → 1, 2, 3
$\sigma_4 = 2$	→	1, 3	$\sigma_5 = 2$ → 1
$\sigma_4 = 3$	→	1, 2	$\sigma_5 = 3$ → 1

6. Come già osservato, per ognuno dei cinque tipi di combinazioni di sillabe ($\zeta = 1, \ldots, 5$) tra le corrispondenti combinazioni di durate quella con il codice $\sigma = 0$ ha lunghezza minima (per $\zeta = 5$ a pari merito con la successiva); queste lunghezze minime sono, per $\zeta = 1, \ldots, 5$ rispettivamente:

$$Lmin\ (1) = Lmin\ (2) = Lmin\ (3) = Lmin\ (4) = 1,\ Lmin\ (5) = 2$$

Chiameremo *lunghezza minima possibile* del verso V_n la somma delle lunghezze minime delle combinazioni di sillabe da cui V_n è formato:

$$Lmin\ (V_n) = \Sigma_i\ Lmin\ (\zeta_i),\ (V_n = \zeta_1\ \zeta_2 \ldots)$$

Il calcolo di questa lunghezza minima possibile di ogni verso V_n permette di decidere se il verso è o non è accettabile (e in questo ultimo caso la poesia non può essere trasformata in una canzone dal programma): le limitazioni che si impongono ai versi V_n sono dovute al fatto che il programma non considera note di durata inferiore alle crome (1/8 di battuta) e ogni verso deve essere accolto in due battute.

7. Consideriamo ad esempio i seguenti versi:

V	$\xi_1\ \xi_2 \ldots$	$\zeta_1\zeta_2 \ldots$
– ∪ ∪ – ∪ ∪ – ∪	3 1 1 3 1 1 3 1	5 5 4
– ∪ ∪ –	3 1 1 3	5 3
– ∪ ∪ – ∪ – ∪ ∪	3 1 1 3 1 3 1 1	5 4 5
∪ ∪ – – ∪	1 1 3 3 1	2 3 4

Diremo che il primo e secondo di questi versi sono *equivalenti* perché il secondo è una porzione iniziale del primo (guardando alla codificazione ξ e *non* alla codificazione ζ); diremo anche che il secondo e terzo sono equivalenti perché il secondo è una porzione iniziale del terzo; ovviamente però questa nozione di equivalenza *non* è transitiva perché il primo e terzo verso *non* risultano equivalenti.

8. Nel programma che stiamo illustrando è consentito l'uso di uno qualunque dei 4 tipi di anacrusi considerati nella sezione 6.4, e cioè:

(7.4) 1 = ♩ , 2 = ♫ , 3 = ♬ , 0 = assenza di anacrusi.

e si usano due delle strutture intervallari considerate nella sezione 6.3, e precisamente:

$$\text{(7.5)} \qquad \begin{cases} 2+2+2+2 \\ 2+2+4 \end{cases}$$

Per quanto riguarda le strutture ritmiche tutte quelle considerate nella sezione 6.3 sono consentite:

$$\text{(7.6)} \qquad \left\{ \begin{matrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 1 \end{matrix} \right\}$$

Va subito osservato che la scelta della struttura ritmica nel presente programma è vincolata dalla struttura dei versi: due coppie di battute con la stessa configurazione ritmica possono ospitare due versi soltanto se questi due versi sono equivalenti nel senso precisato nel punto precedente. Ad esempio la quarta struttura ritmica (7.6) impone che la quinta e sesta battuta (che devono ospitare il terzo verso) abbiano la stessa configurazione ritmica della terza e quarta battuta (che devono ospitare il secondo verso) e questo è possibile soltanto se il secondo e terzo verso sono equivalenti; analogamente il primo e quarto verso devono essere equivalenti. Come si è visto due versi equivalenti possono avere un numero diverso di sillabe, quando uno risulta una prima porzione (troncata) dell'altro.

7.4 *Calcolo del ritmo della canzone*

Nel calcolo di *RC* (cioè del ritmo della canzone) per un assegnato *RV* (cioè ritmo dei versi) si possono distinguere due fasi:
Nella prima fase, analizzando *RV*, si decide se esso è accettabile e in caso

affermativo si determinano le possibili varianti delle strutture intervallari, ritmiche, e dell'anacrusi di cui si può fare uso per i versi assegnati.
Nella seconda fase il ritmo *RC* viene determinato sulla base delle strutture individuate e viene trasmesso al programma *PM* per la costruzione della linea melodica.
Illustriamo ora separatamente i vari aspetti logici di questo calcolo.
1. La struttura intervallare *SI* e ritmica *SR* vengono determinate per fissare le possibili ripetizioni delle configurazioni ritmiche.
2. Poiché ogni verso deve essere ospitato in una coppia di battute (cioè in un tratto lungo 8 semiminime) la lunghezza minima possibile di ogni verso, definita nel punto 6 della sezione precedente, deve necessariamente soddisfare alla limitazione:

$$Lmin\ (V_n) \leqslant 8 \qquad (n = 1, 2, 3, 4)$$

Inoltre, per meglio staccare il termine di una frase dall'inizio della frase successiva, se la lunghezza minima possibile di V_n raggiunge il valore 8 allora l'algoritmo richiede che l'ultima sillaba di V_n sia accentata ($\xi = 3$); in tal caso la tabella (7.3′) garantisce che la nota corrispondente a quest'ultima sillaba ha almeno la durata di una semiminima. Una unica eccezione è tollerabile: al termine del terzo verso: esso può raggiungere $Lmin = 8$ e anche terminare con una sillaba non accentata che può anche essere tradotta in una croma, ma in tal caso si rimedia decidendo di *non* terminare la frase, riunendo in una frase di 4 battute il terzo e quarto verso. È questo il caso in cui in luogo della struttura intervallare

$$2 + 2 + 2 + 2$$

si usa la struttura

$$2 + 2 + 4.$$

3. La struttura ritmica viene scelta tra le quattro possibili strutture (7.6) in modo che configurazioni ritmiche uguali vengano imposte soltanto a versi

equivalenti nel senso precisato nella sezione precedente. Si può osservare che due versi equivalenti possono anche essere tradotti in configurazioni ritmiche differenti.

4. Codificando con 1, 2, 3, 0 i quattro tipi di anacrusi (7.4) indichiamo alcuni esempi di versi e i corrispondenti tipi di anacrusi applicabili ad essi:

$$
\begin{array}{ll}
- \cup - \cup \ldots. & \rightarrow \ 0, 2 \\
\cup - \cup - \ldots. & \rightarrow \ 1, 3 \\
\cup \cup - \cup \ldots. & \rightarrow \ 2 \\
- - \cup - \ldots. & \rightarrow \ 0, 1, 3 \\
- \cup \cup - \ldots. & \rightarrow \ 0
\end{array}
$$

Come si vede l'anacrusi può giungere fino alla prima o seconda sillaba accentata, ma non può mai superare tre sillabe. Nell'ultimo esempio elencato la mancanza di accento nella seconda sillaba rende sconsigliabile l'uso dell'anacrusi 3. Va tenuto presente che in un periodo musicale tutte le (quattro o tre) frasi devono iniziare con lo stesso tipo di anacrusi. (Se questo non è possibile allora la composizione in versi non è accettabile.)

5. Se, nell'ambito concesso dai vincoli, rimangono alcune varianti di struttura ritmica o di anacrusi accettabili, allora la scelta è basata su numeri pseudocasuali (o viene trasmessa dal quadro comandi).

6. Le informazioni strutturali descritte nel punto 8 della sezione 7.3 (comprese anche le informazioni sulla struttura melodica se si compone il presente programma *PC* con il programma *PM* per il calcolo della linea melodica) si inquadrano nella matrice (6.11) descritta nella sezione 6.4.

7. La struttura ritmica (che è una delle quattro possibili strutture ritmiche (7.6)) attribuisce ad ogni verso il *codice ritmico* $r = 1$ oppure $r = 2$; ad esempio se viene fissata la quarta delle (7.6) allora il primo e quarto verso ricevono il codice $r = 1$ mentre il secondo e terzo verso ricevono il codice ritmico $r = 2$. Consideriamo ora per ogni valore di r i versi V_n i cui codici ritmici $r(n)$ hanno valore r: come abbiamo già osservato questi versi (pur dovendo essere equivalenti) possono avere un numero diverso $s(n)$ di sillabe. Nell'ambito di questi versi (cioè di questi valori di n per cui $r(n) = r$) importa considerare il minimo e il massimo numero delle loro sillabe:

$$\min_{r(n)=r} s(n) \quad , \quad \max_{r(n)=r} s(n)$$

e anche il valore dell'indice m(r) che individua il verso $V_{m(r)}$ che ha il massimo numero di sillabe:

$$s(m(r)) = \max_{r(n)=r} s(n)$$

(scegliendo, in caso di parità, ad esempio il primo di questi versi).

8. Le combinazioni di durate contenute nella tabella (7.3′) vengono scelte (salvo nei casi $\zeta = 1$ e $\zeta = 2$ nei quali non c'è libertà di scelta) mediante estrazioni di numeri pseudocasuali.

9. L'uso della tabella (7.3″) evita le "legature" attraverso i tratti che separano le battute, cioè ogni battuta inizia con una nota e non con il prolungamento del suono della battuta precedente.

10. Esaminiamo ora lo schema di costruzione del ritmo: riprendiamo il discorso iniziato nel punto 7 di questa sezione.

Per ogni valore fissato di r si costruisce anzitutto il ritmo del verso $V_{m(r)}$ (che nell'ambito dei versi con la stessa configurazione ritmica r ha il massimo numero di sillabe); esso servirà da modello per tutti gli altri versi con la stessa configurazione ritmica r.

Per questo verso $V_{m(r)}$ il ritmo si costruisce seguendo le idee esposte precedentemente, e in particolare secondo quanto detto nei punti 8 e 9 di questa sezione. Bisogna anche, alla fine di ogni frase, lasciare il posto per l'anacrusi della frase successiva.

Se la combinazione di durate costruita per questo verso $V_{m(r)}$ non soddisfa tutti i requisiti allora il procedimento si ripete tentando altre estrazioni di numeri pseudocasuali.

Per tutti gli altri versi con la stesso codice ritmico r (e con un numero di sillabe uguale o minore) il ritmo si costruisce ricopiando fin dove occorre quello costruito per il modello $V_{m(r)}$. Bisogna infine verificare che tra questi versi non ce ne sia qualcuno con un numero troppo piccolo di sillabe per il quale l'ultima nota di una frase di due battute cadrebbe nella prima di queste due battute.

11. Associando il programma descritto nel capitolo precedente si viene ad

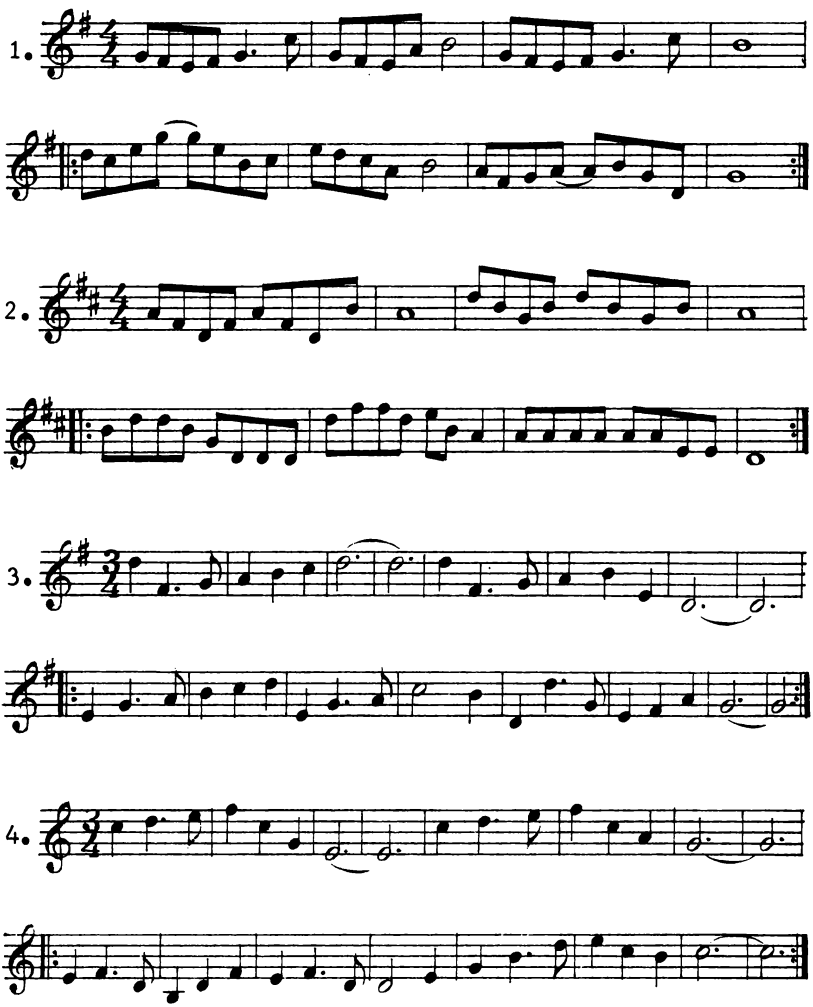
avere un programma che dopo aver calcolato il ritmo della canzone continua il calcolo e compone una melodia col ritmo calcolato, in modo da poter cantare i versi assegnati.

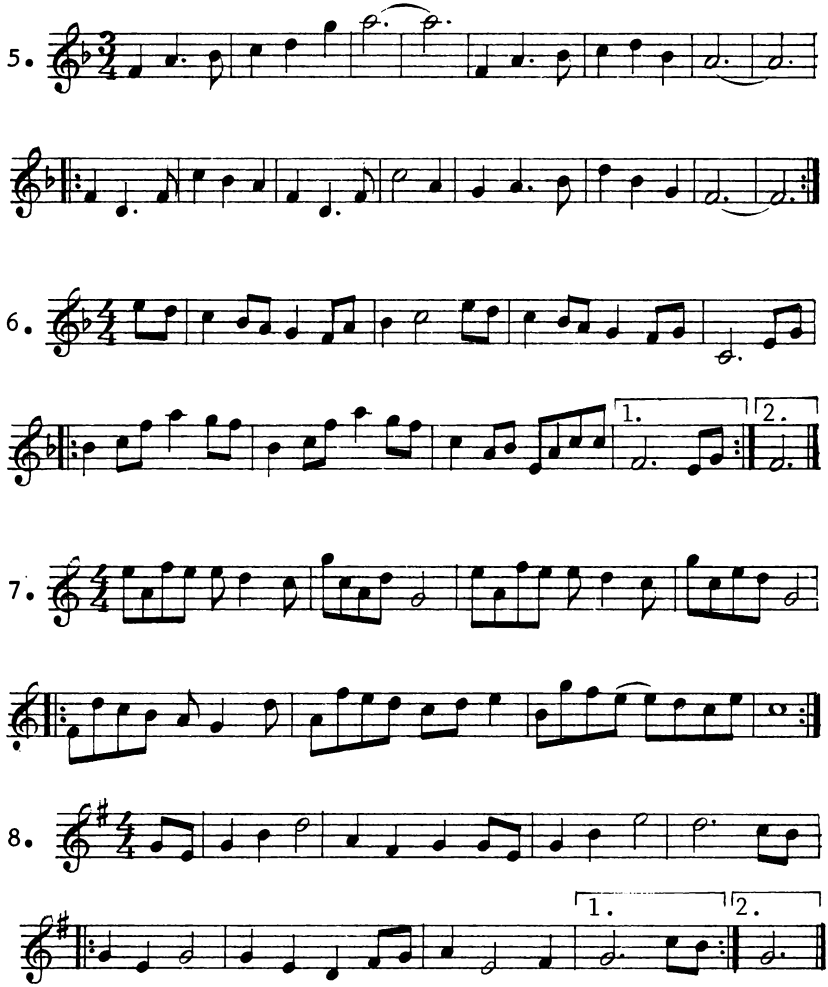
7.5 *Alcune particolarità del programma*

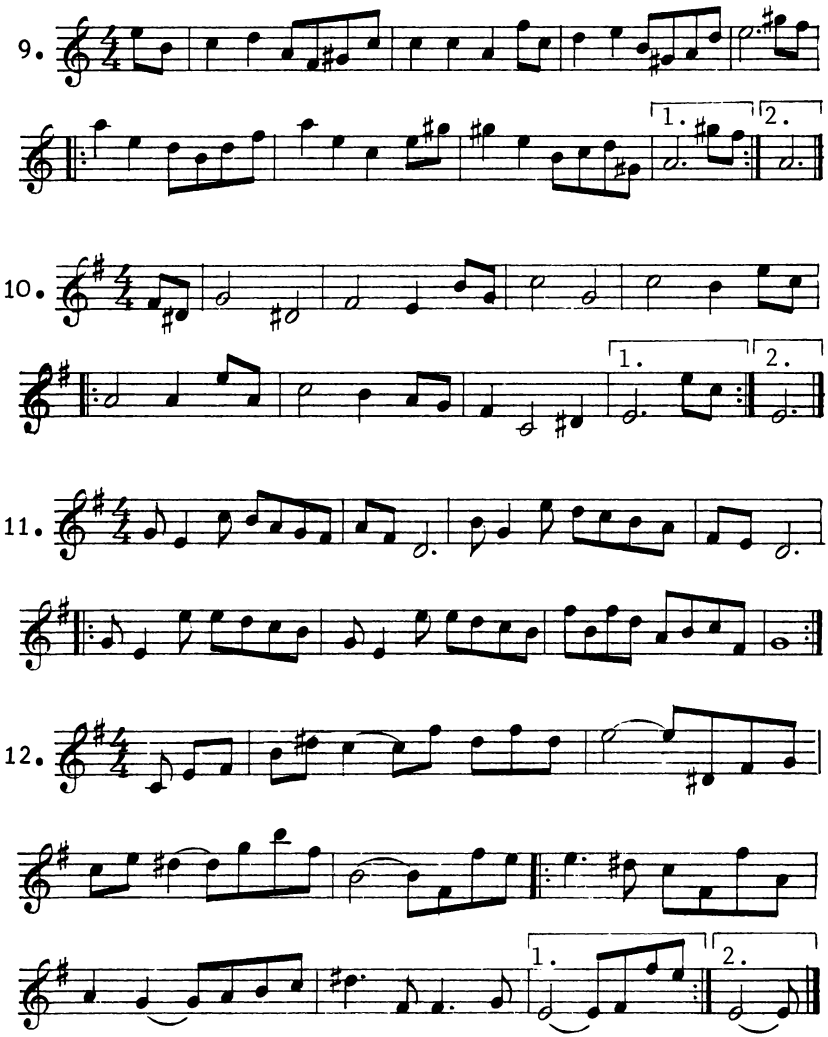
L'algoritmo descritto in questo capitolo è stato tradotto in un programma per la macchina elettronica URAL-2. Questo programma occupa circa 2000 locazioni di memoria (cioè circa come il programma descritto nel capitolo precedente) e richiede un tempo di calcolo di 10-15 secondi per costruire il ritmo di otto battute. Le possibilità di guidare le scelte della macchina dal quadro di comando sono analoghe a quelle presentate dal programma descritto nel capitolo precedente. Tra i vari ritmi ottenuti dalla macchina prima che inizi la costruzione della melodia l'operatore può scegliere quello che risulta preferibile tenendo conto del significato delle parole dei versi. Il ritmo scelto viene segnalato alla macchina semplicemente trasmettendo i valori dei parametri che lo individuano.

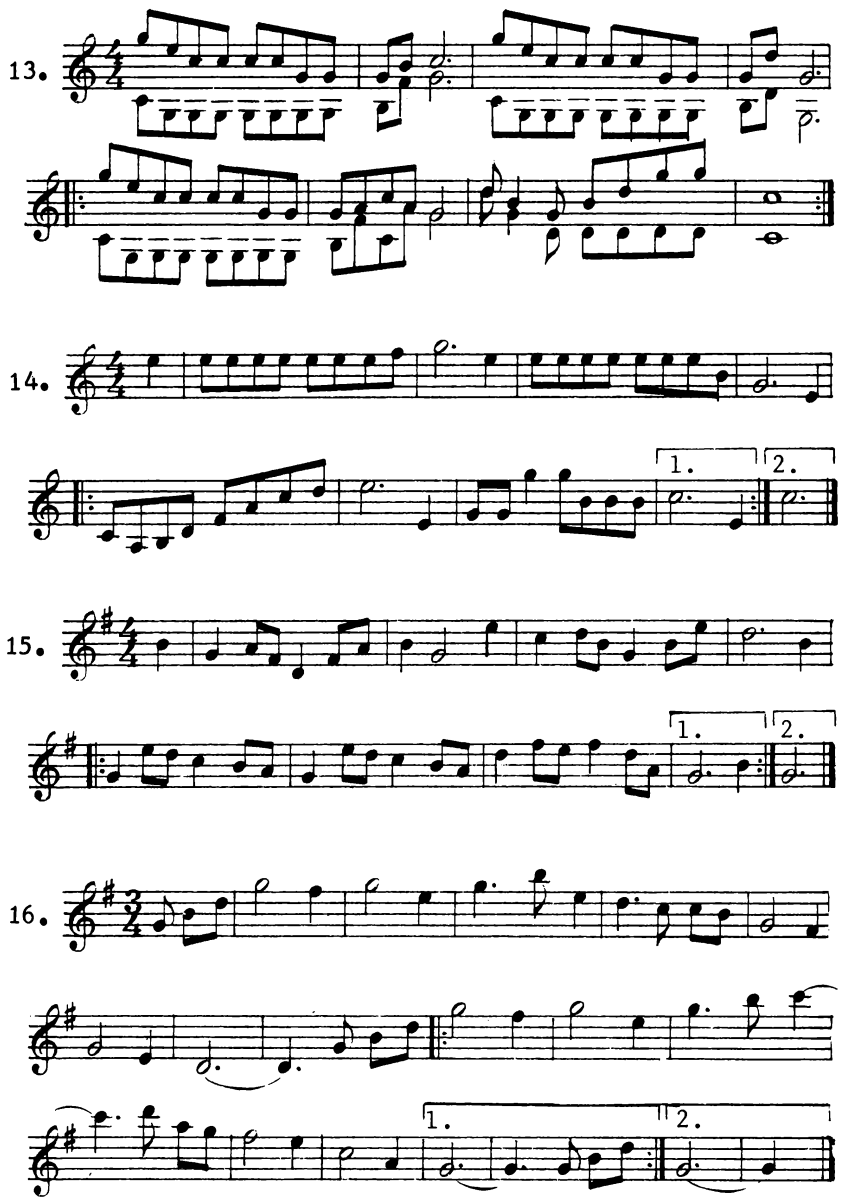
Appendici

Appendice 1 - *Alcune melodie composte dalla macchina* URAL.

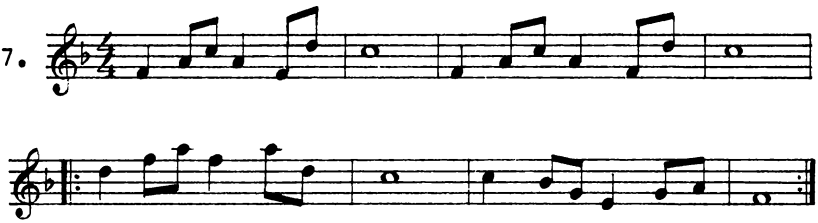



5.
6.
1.
2.
7.
8.
1.
2.

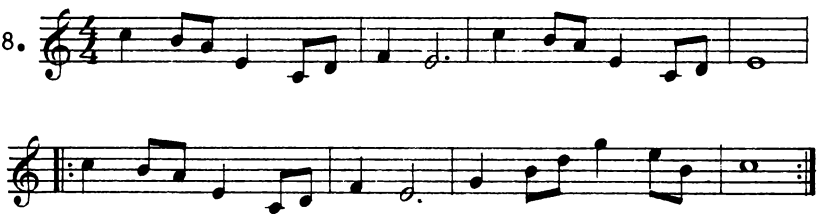

9.
1.
2.
10.
1.
2.
11.
12.
1.
2.


13.
14.
1.
2.
15.
1.
2.
16.
1.
2.

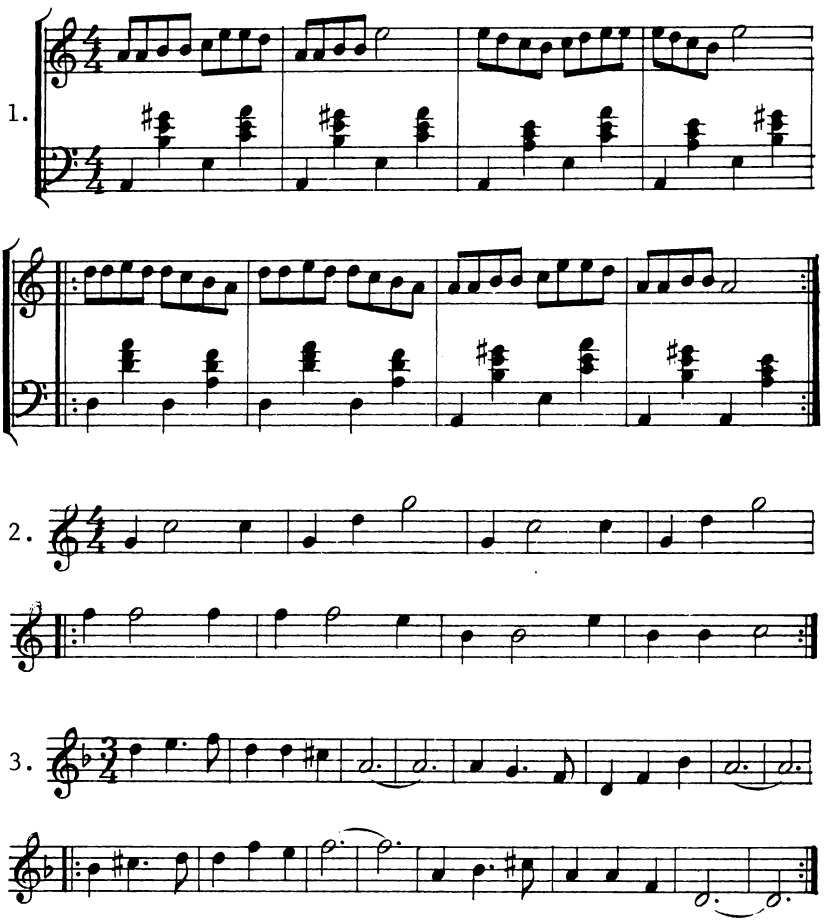
17.

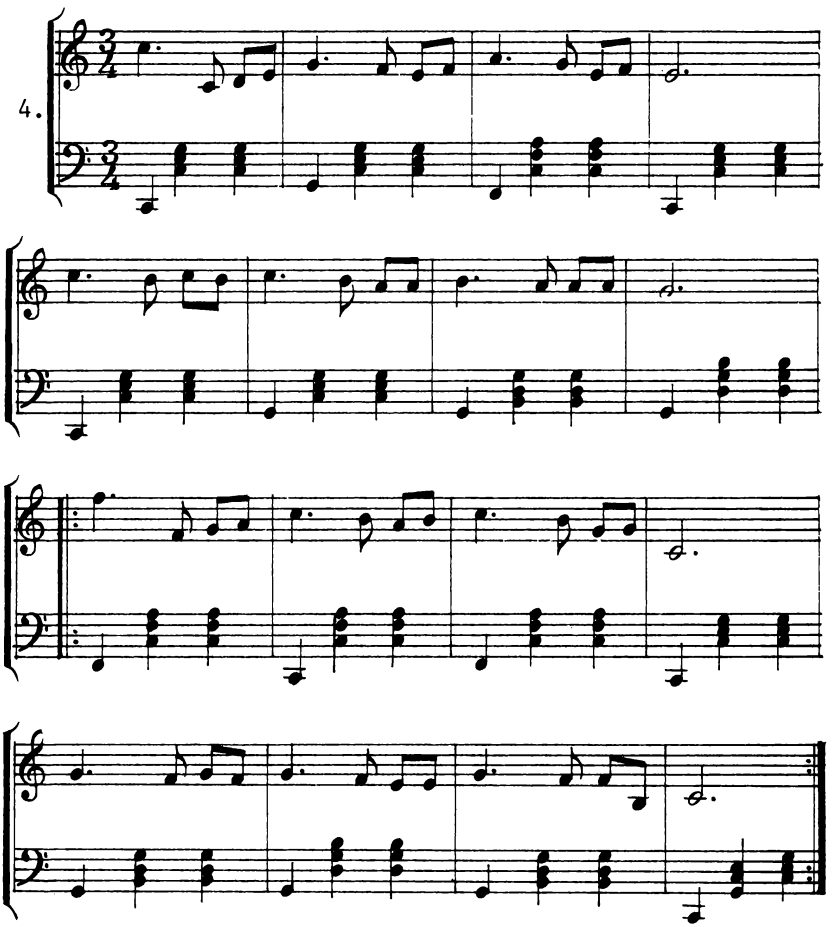


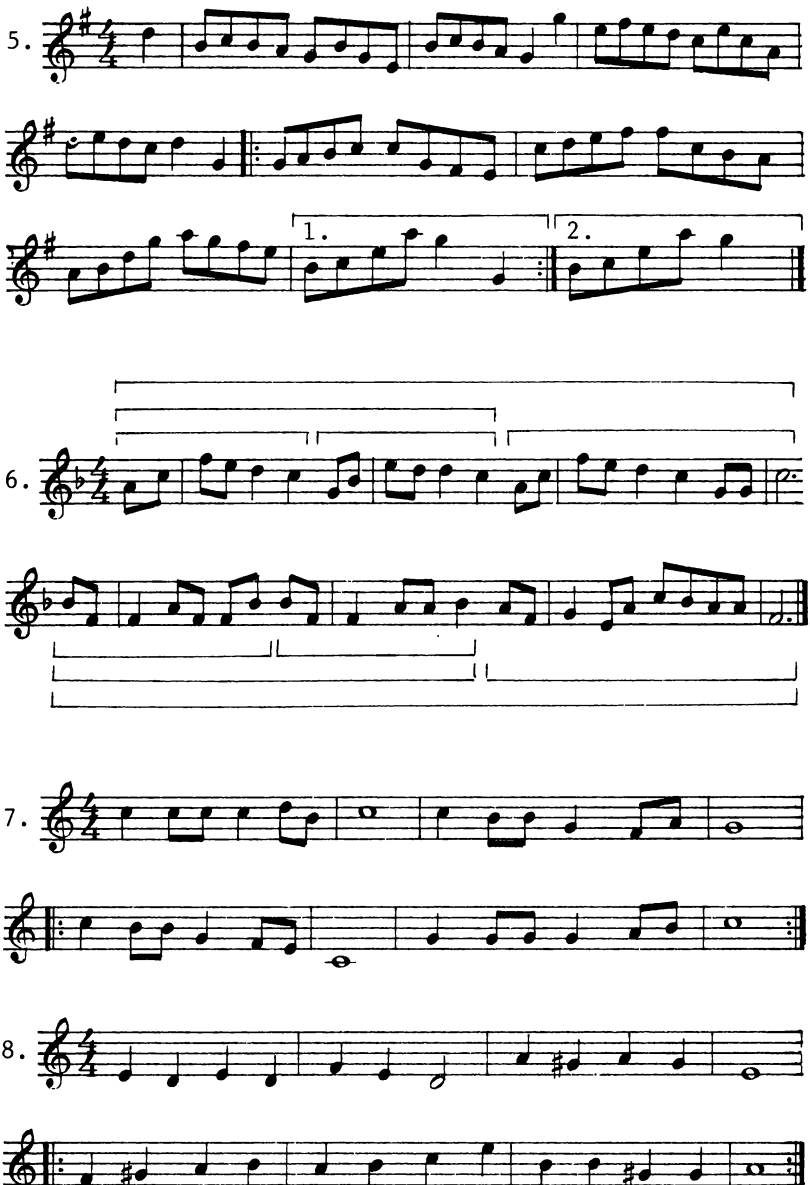
18.

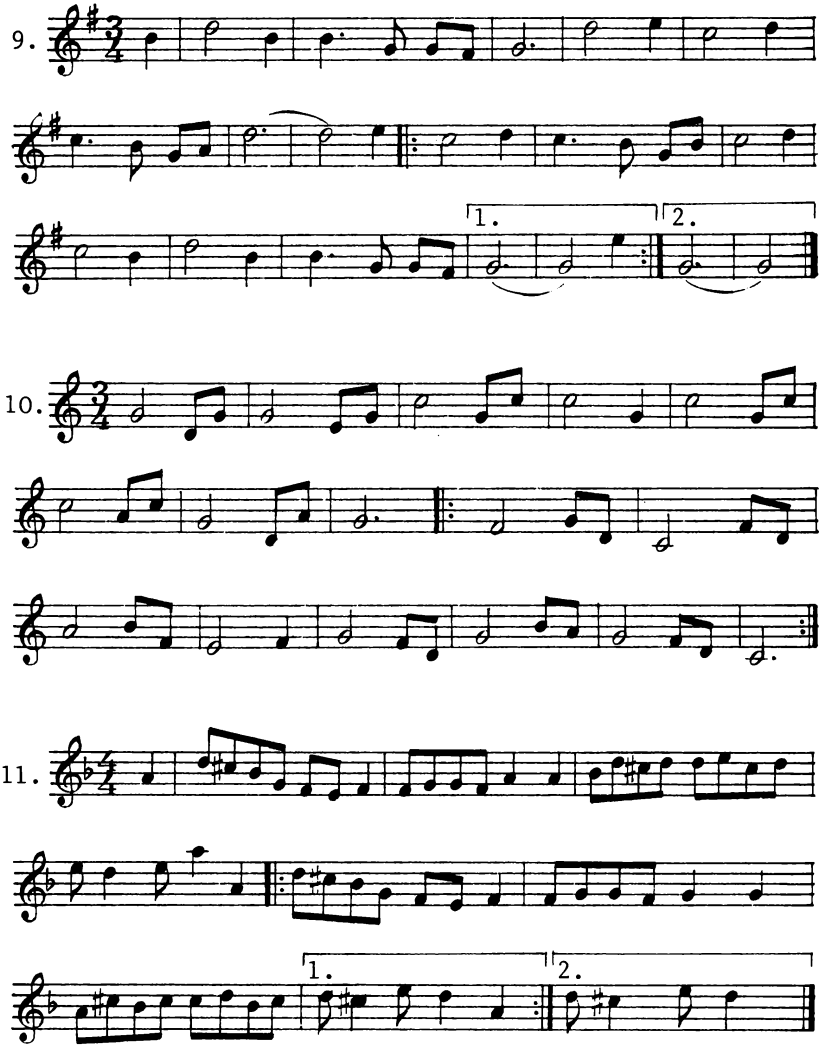


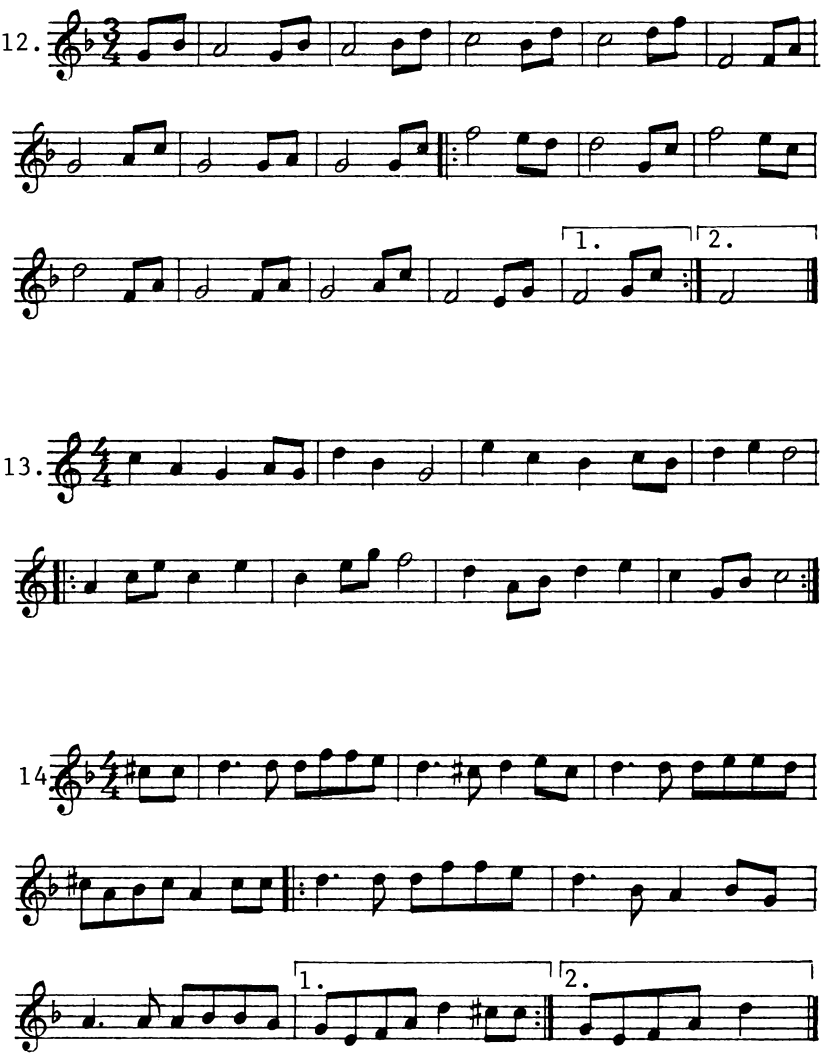
Appendice 2 - *Alcune composizioni della macchina* URAL-2 *ottenute con l'algoritmo descritto nel capitolo 6.*

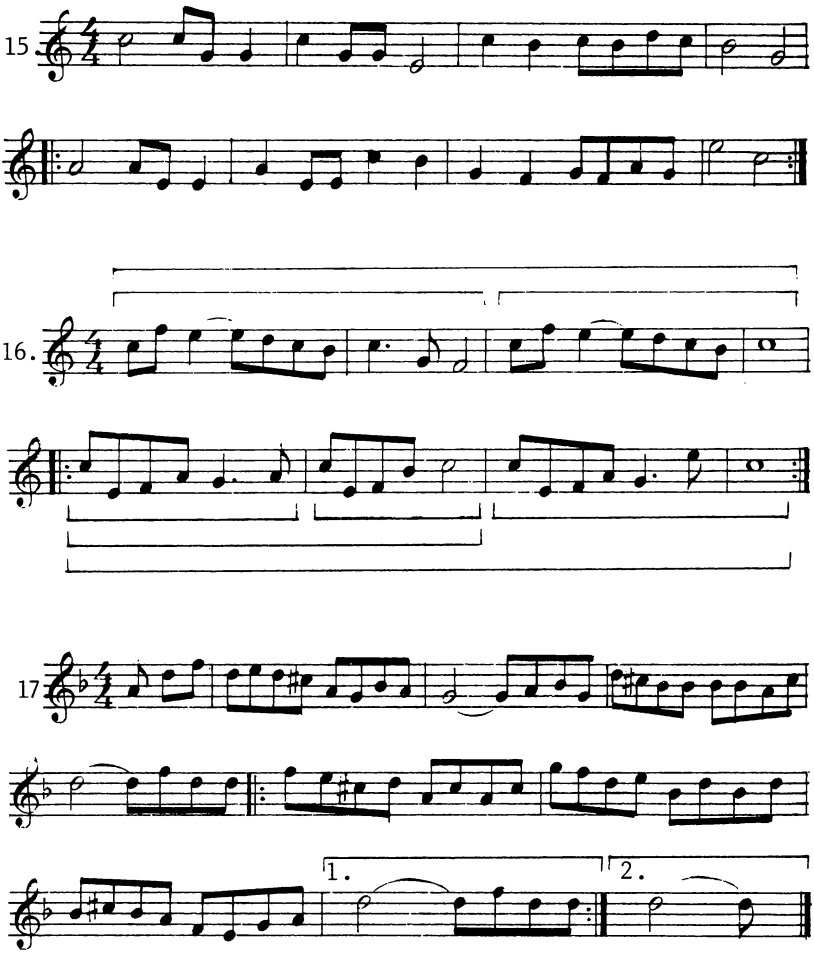


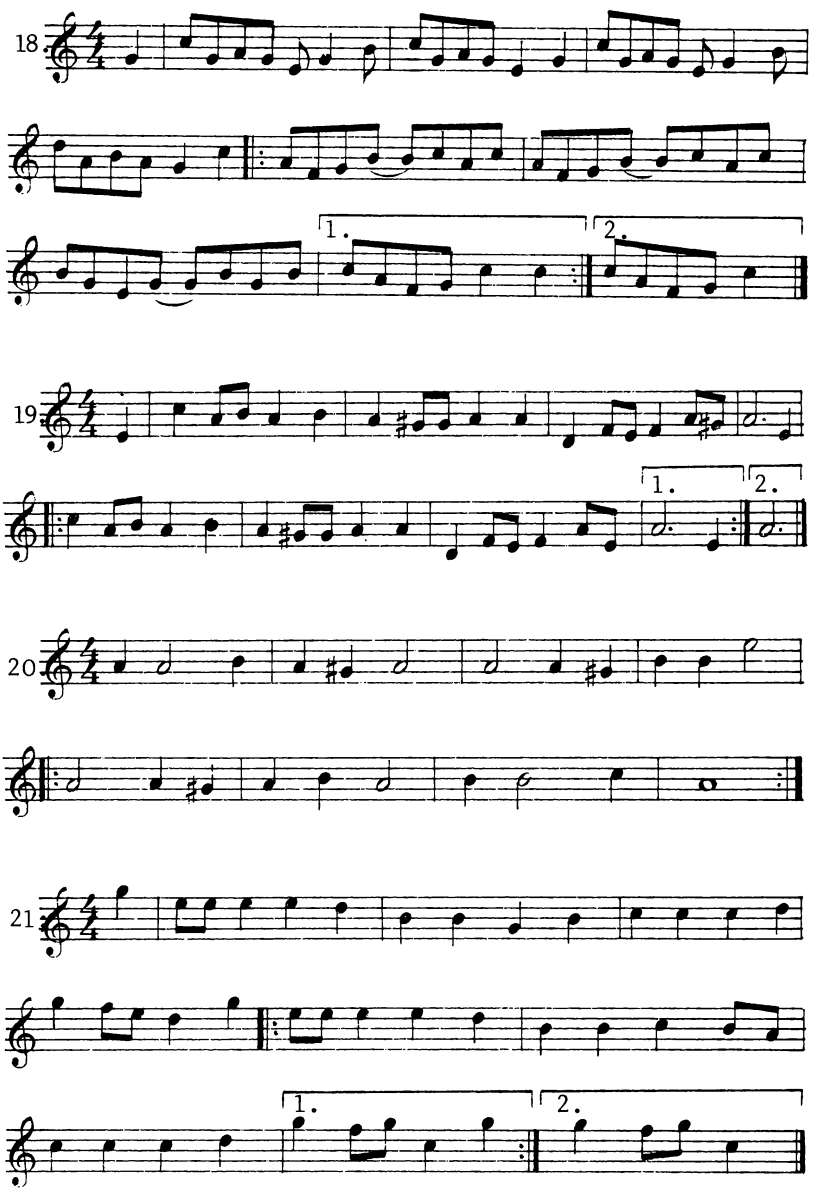

4.

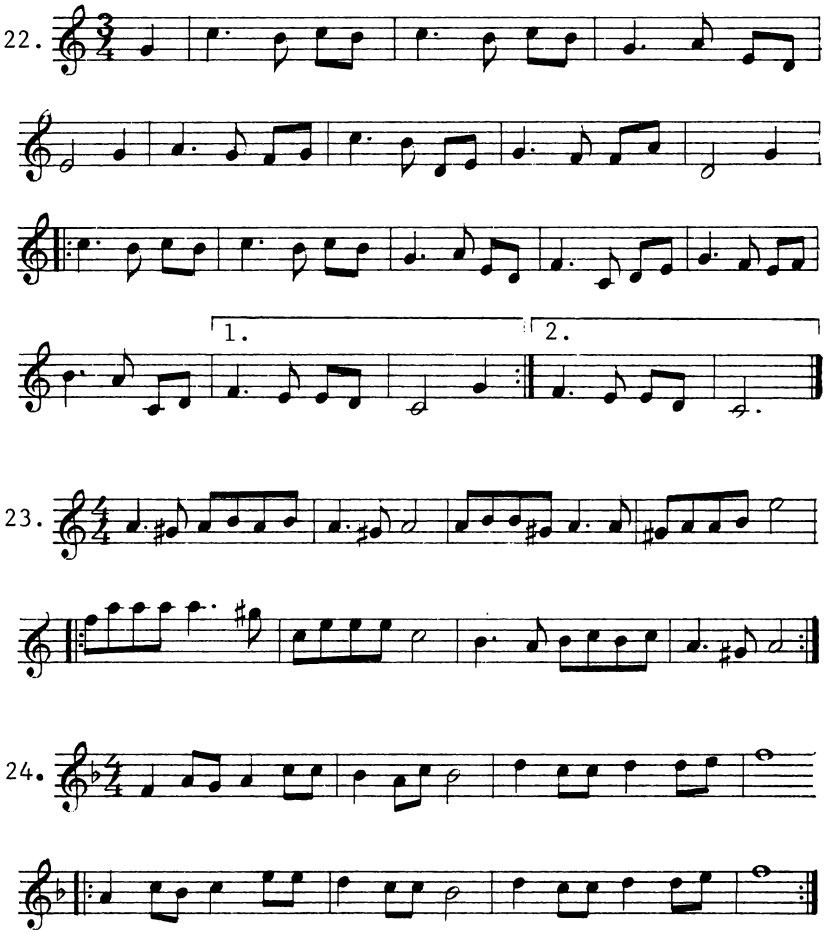

5.
1.
2.
6.
7.
8.

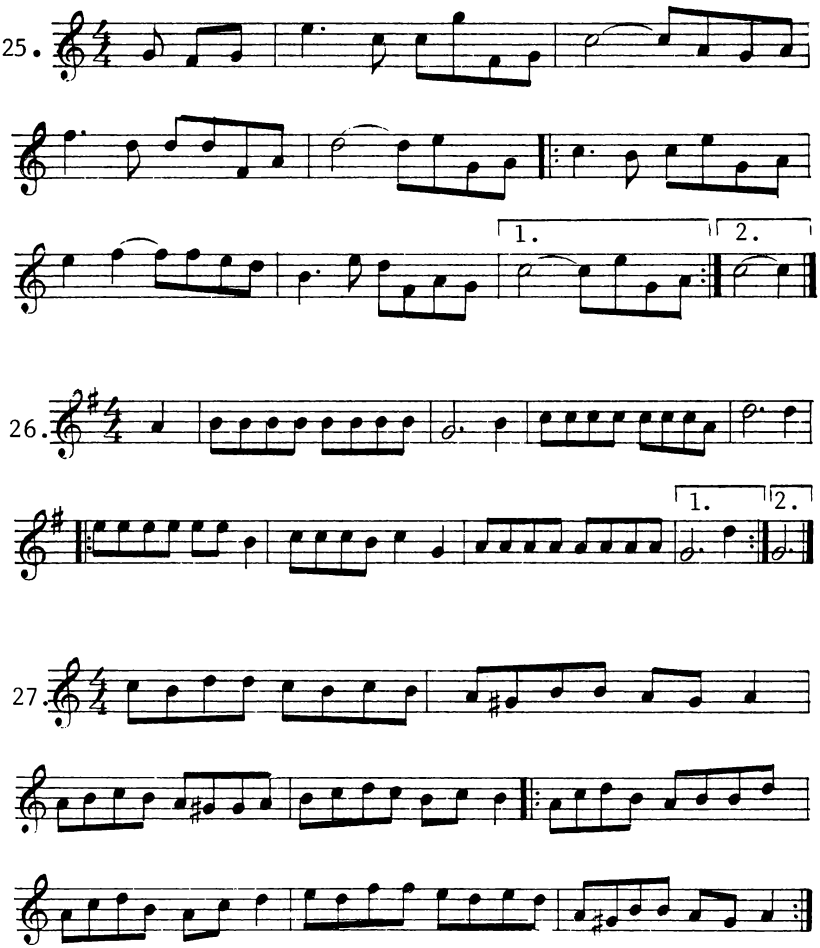

9.
1.
2.
10.
11.
1.
2.


12.
1.
2.
13.
14
1.
2.

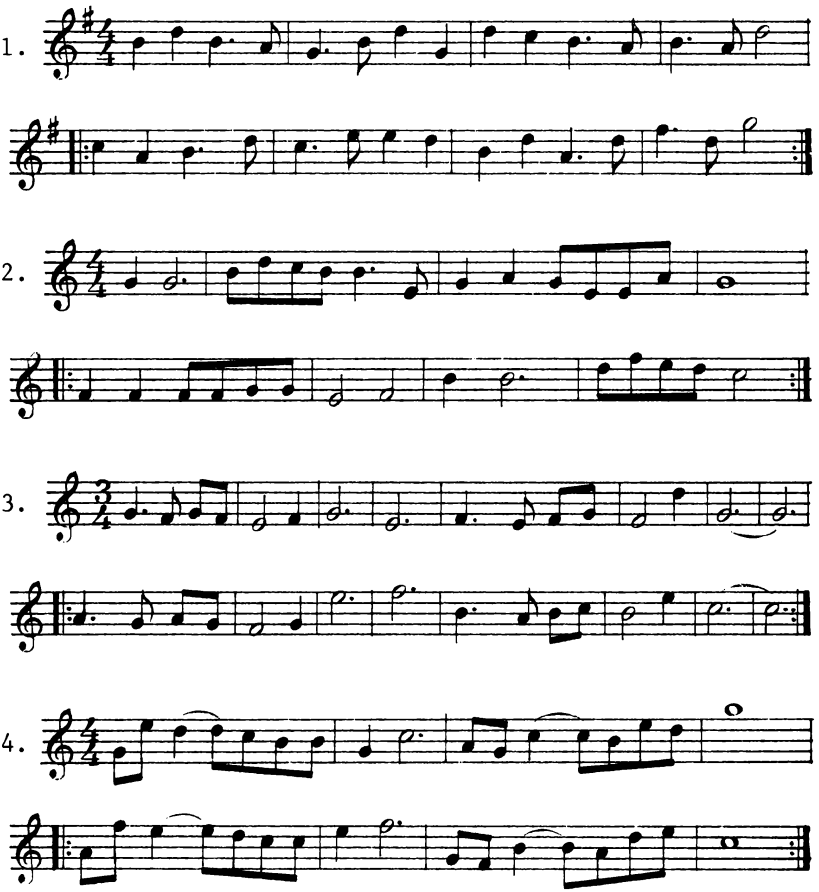

15
16.
17
1.
2.

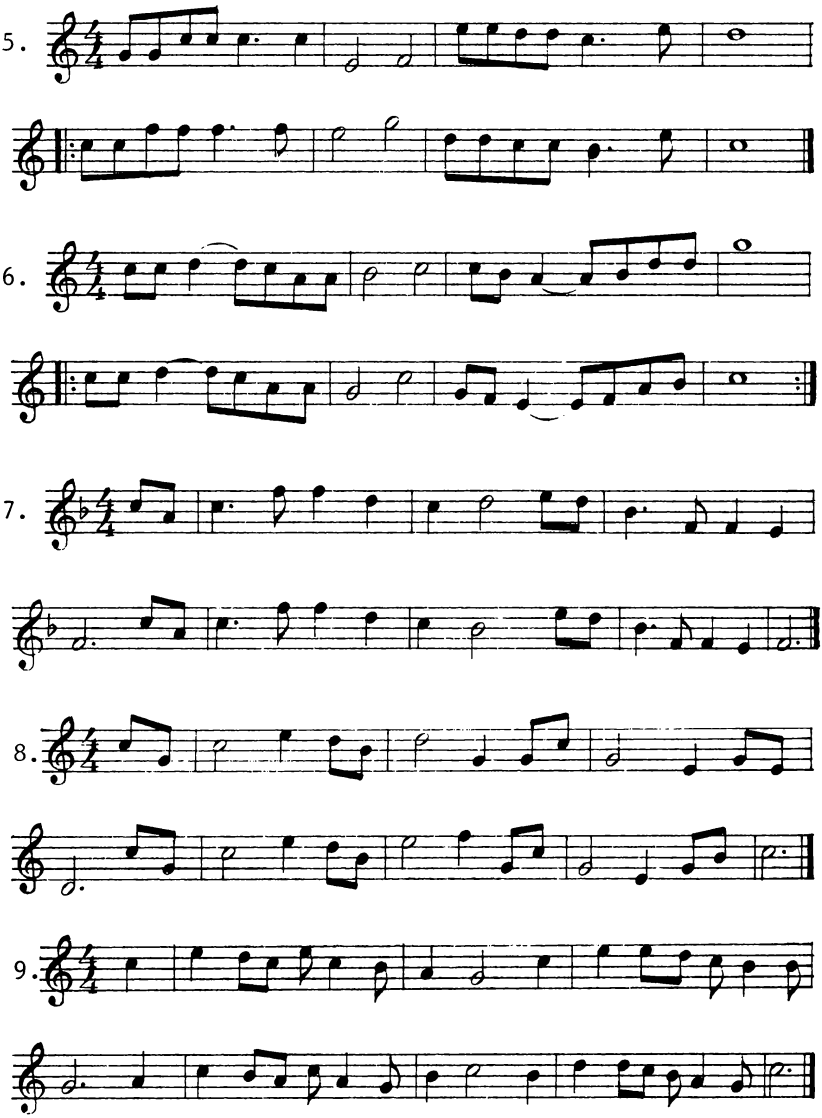

18
1.
2.
19
1.
2.
20
21
1.
2.

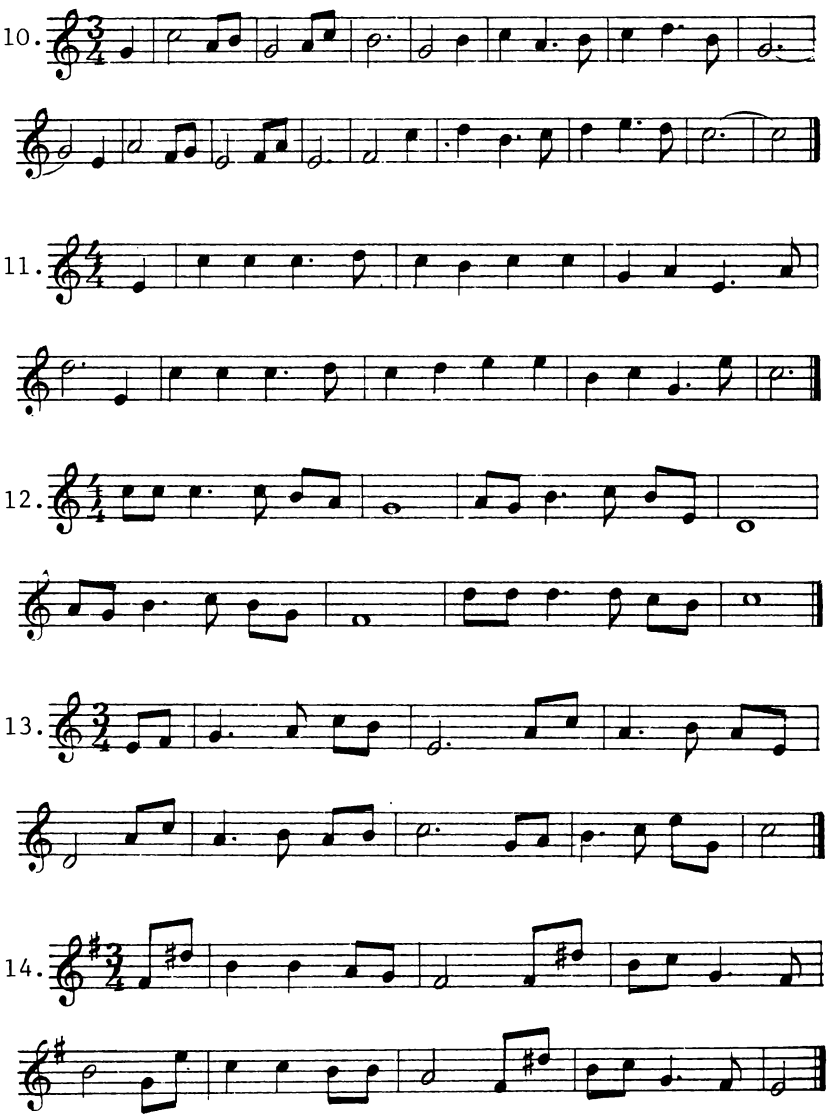

22.
1.
2.
23.
24.


25.
1.
2.
26.
1.
2.
27.

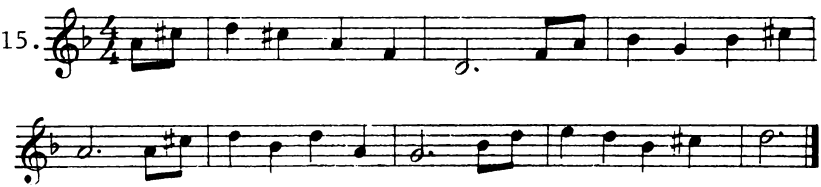
Appendice 3 - *Alcune canzoni composte dalla macchina* URAL-2 *con l'algoritmo descritto nel capitolo 7 su un ritmo di versi assegnato.*





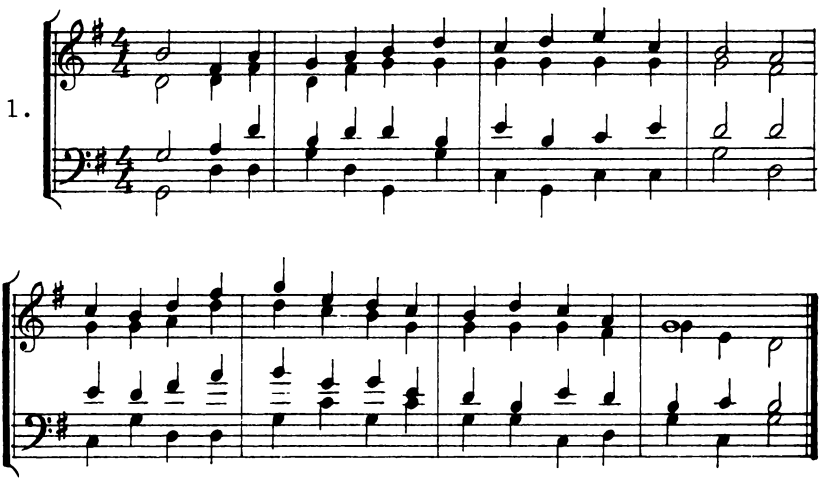


15.

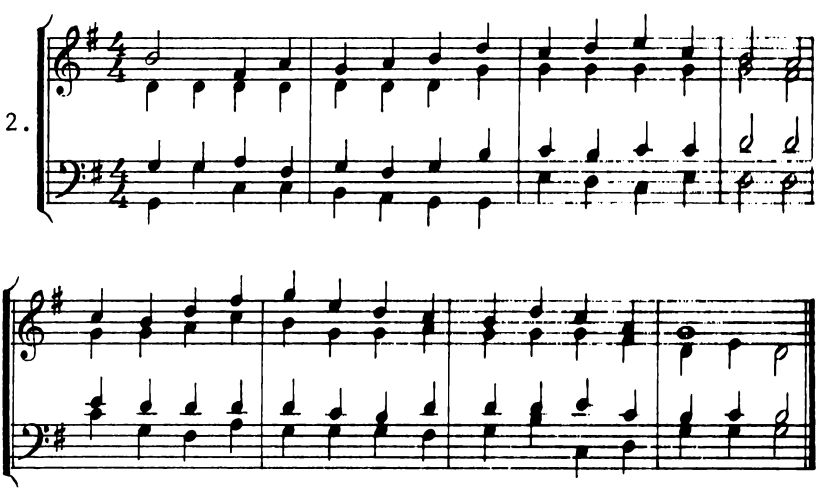


Appendice 4 - *Armonizzazioni di melodie ottenute dalla macchina* URAL-2 *con un programma che traduce le regole dell'armonia classica nel linguaggio matematico introdotto nel capitolo 5.*

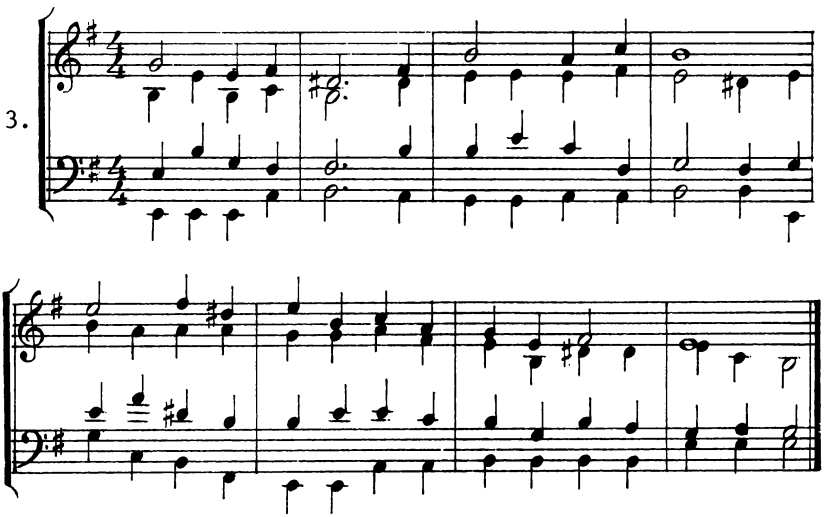
1.



2.



3.



Bibliografia

Le indicazioni bibliografiche originali, ove possibile, sono state controllate e completate, indicandone le eventuali traduzioni in lingue occidentali. Quelle che non hanno potuto essere reperite, sono state riportate letteralmente.

[1] AKFILOV, G.: *Fizika i Muzyka* Mosca, 1962, 1964 [tr. ingl. *Physics and Music* Mosca: Mir, 1966]

[2] ARMER, P.: "O Vozmožnostjach Kibernetičeskich sistem" nell'edizione russa di M. TAUBE *Computers and common sense* New York: Mc Graw-Hill, 1961 [tr. in russo *Vyčislitel'nye mašiny i zdravyi smysl* Mosca: Progress, 1964]

[3] BABBIT, M.: "Twelve-tone invariants as compositional determinant" *Musical Quarterly* 46, 2 (1960)

[4] BABBIT, M.: "Set structure as a compositional determinant" *Journal of Music Theory* 5, 1 (1961)

[5] BARBOUR, J.: "Comment. on 'Aid to Music Composition Employing a Random Probability System'" *The Journal of the Acoustical Society of America* 34 (1962) 128-129

[6] BENSE, M.: *Aesthetica* 4 voll. Baden-Baden: Agis, 1954 1965 [tr. it. *Estetica* vol. unico, Milano: Bompiani, 1974]

[7] BEZBORODOV, JU. M., V.B. ORLOV: "Masina igraet v sachmaty" [La macchina che gioca a scacchi] in *Matematičeskoe Prosveščenie* 6 (1961)

[8] BOGANOVA, T.V.: *O Melodii* [Sulla melodia] Sovietskij kompozitor, 1960

[9] BOTVINNIK, M.M.: *Algoritm igry v sachmaty* Nauka, 1968 [tr. ingl. *Computer, chess and long-range planning* Berlin: Springer, 1970]

[10] BROOKS, F.P, A.L. HOPKINS, P.G. NEUMANN, W. WRIGHT: "An Experiment in Musical Composition" *IRE Transaction on electronic computers* EC-6 (1957) 175-182 e F.P. BROOKS "Correction" *ibid* EC-7 (1958) 60

[11] BUCHARAEV, R.G., M.S. RYTVINSKAJA: "Modelirovanie processa tvorčestva na primere sočinenija vos'mitaktnoj melodii" [Simulazione del processo creativo sull'esempio della composizione di una melodia di otto battute] *Tezisy dokladov naučnoj konferencii Kazanskogo Universiteta.* Kazan', 1961

[12] BUCHARAEV, R.G., M.S. RYTVINSKAJA: "O modelirovanii verojatnostnogo processa, svjazannogo s socineniem pesennoj melodii" [Sulla simulazione del processo probabilistico relativo alla composizione di una melodia] *Kazanskij Universitet. Učenye Zapiski* 122, 4 (1962) 82

[13] COHEN, E.: "Information theory and music" *Behavioral Science* 7 (1962) 137-163

[14] COMET, S.: "Sur l'utilisation de la machine mathématique BESK pour la production de sons complexes" Congr. internat. automat. Paris, 1956

[15] DETLOVS, V.K.: "Matematičeskij sintez muzyki" [Sintesi matematica della musica] *Nauka i technika* 9 (1965)

[16] DETLOVS, V.K.: "Muzyka, matematika, celovek" [Musica, matematica, uomo] *Nauka i žizn'* 7 (1968) 45-49

[17] DETLOVS, V.K.: "Opyt statističeskogo issledovanija garmonii [Tentativo di analisi statistica dell'armonia] *Trudy VI Vsesojuznoj akustičeskoj konferencii, sekcija KV4* Mosca, 1968

[18] DETLOVS, V.K.: "O statističeskom analize muzyki" [Sull'analisi statistica della musica] *Latvijskij matematičeskij ežegodnik* 3 (1968)

[19] DEUTSCH, O.E.: "Mit Würfel komponieren" *Zeitung für Musikwissenschaft* 12, 9-10 (1930)

[20] DUBOVSKIJ, I.I., C.V. EVSEEV, I.I. SPOSOBIN, V.V. SOKOLOV: *Učebnik garmonii* [Manuale di armonia] Muzgiz, 1962

[21] *Enciklopedičeskij muzykal'nyj slovar'* [Dizionario musicale enciclopedico] 2ª ed., Sovestkaja Enciklopedija, 1966

[22] EVGRAFOV, M.A., I.B. ZADYCHAJLO: "Nekotorye soobraženija o programmirovanii šachmatnoj igry" *Problemy kibernetiki* 15 (1965)

[23] FEIGENBAUM, E.A., J. FELDMAN: ed. *Computers and Thought* New York:

McGraw-Hill, 1963

[24] FENCL, Z.: "Komponujici algoritmus a obsah informace [Un algoritmo di composizione e contenuti informativi] *Kybernetika* 2, 3 (1966) 243

[25] FERENTZY, E.N., M. HAVASS: "Human movement analysis by computer. Electronic choreography and music composition" *Computational Linguistics* 3 (1964) 129-188

[26] FRID, R.: *Vyrazitel'nye sredestva muzyki* [Mezzi espressivi della musica] Leningrado, 1960

[27] FUCKS, W.: "Mathematical analysis of formal structure of music" *IRE Transaction on Information Theory* IT-8 (1962) 225-228

[28] FUCKS, W.: "Matematische Musikanalyse und Randomfolgen. Musik und Zufall" *Gravesaner Blätter* 6, 23-24 (1962)

[29] GARBUZOV, N.A.: *Zonnaja priroda zvukovysotnogo slucha* [Carattere locale dell'ascolta dell'altezza del suono] Mosca, Leningrado, 1948

[30] GARBUZOV, N.A.: *Zonnaja priroda tempa i ritma* [Carattere locale del tempo e del ritmo] Mosca, Leningrado, 1950

[31] GARBUZOV, N.A.: *Vnutrizonnyi intonacionnyi sluch i metody ego razvitija* [Intonazione locale interna dell'udito e i metodi del suo sviluppo] Mosca, Leningrado, 1951

[32] GARBUZOV, N.A.: *Zonnaja priroda tembrovogo slucha* [Carattere locale dell'ascolto del timbro] Mosca, 1956

[33] GARBUZOV, N.A.: a cura di *Muzykal'naja akustika* [Acustica musicale] Muzgiz, 1964

[34] GEORGI, G., H. SCHEMMEL: "Über automatisches Komponieren" *Probleme der Kibernetik* (1963)

[35] GERIK, H.: "Würfelmusik" *Zeitung für Musikwissenschaft* 16, 7 8 (1934)

[36] GILL, S.: "A technique for the composition in a computer" *The Computer Journal* 6, 2 (1963) 129

[37] GLUSKOV, V.M.: *Teorija algoritmov* [Teoria degli algoritmi] Kiev, 1961

[38] GNESIN, M.F.: *Načalnyj kurs praktičeskoj kompozicii* [Corso fondamentale di composizione pratica] Mosca, 1962

[39] GOLOVIN, E.: "Programmirovanye prekrasnogo" [Programmazione del bello] *Innostrannaja literatura* 7 (1966) 199-206

[40] GREKOVA, I.: "K voprosu ob informacii" [Del problema sull'informazio-

ne] *Nauka i žizn'* 3 (1967) 31-37

[41] GUMČIN, I.B.: *Formal'nye nejrony v bionike* [Neuroni formali in bionica] Znanie, 1967

[42] GUMČIN, I.B.: *Kibernetičeskie modeli tvorčestva* [Modelli cibernetici della creazione] Znanie, 1969

[43] GUTTMAN, N.: "Über die Computer-Musik-Beispiele" *Gravesaner Blätter* 6, 23-24 (1962)

[44] HAVASS, H.: "A simulation of musical composition. Synthetically composed folkmusic" *Computational Linguistics* 3 (1964) 107-128

[45] HILLER, L.A., L.M. ISAACSON: *Illiac Suite for String Quartet* New Music ed., vol. 30, n. 3, Bryn Mawr, Pennsylvania: Theodore Presser, 1957

[46] HILLER, L.A., L.M. ISAACSON: *Experimental Music* New York: McGraw-Hill, 1959

[47] HILLER, L.A.: "Computer Music" *Scientific American* 201, 6 (1959) 109-120

[48] HILLER, L.A.: "Form recognition in music" in *Information Processing 65, Proceedings of IFIP Congress* 1965

[49] HOWE, H.S.: "Music and electronics: a report" *Perspective of new music* 4, 2 (1966)

[50] HUGGINS, PH.: "Three-part music with a computer as one part" *Computers and Automation* 7, 3 (1958)

[51] JAGLOM, A.M., I.M. JAGLOM: *Verojatnost' i informacija* [Probabilità e informazione] Fizmatgiz, 1960

[52] JANOV, JU. I.: "O logičeskich schemach algoritmov" *Problemy kibernetiki* 1 (1958) [tr. ingl. "The logical schemes of algorithm" *Problem of Cybernetics* 1 (1960) 82-140]

[53] JONES, A.M., H.S. HOWE: *IML - An intermediary musical language* Princeton University, 1964

[54] KASSLER, M.: *The decision of Arnold Schönberg's twelve-noteclass system and related systems* Princeton, 1961

[55] KASSLER, M.: "A sketch of the use of formalized languages for the assertion of music" *Perspective of new music* 1, 2 (1963)

[56] KASSLER, M.: *An essay toward specification of a music reading machine* Princeton University, 1963

[57] KASSLER, M.: *A report of work, directed toward explication of Schen-*

ker's theory of tonality, done in summer 1962 as the first phase of project concerned with the application of high-speed automatic digital computers to music and to musicology Princeton University, 1964

[58] KASSLER, M.: "Toward musical information retrieval" *Perspective of new music* 4, 2 (1966)

[59] KATUAR, G.L.: *Muzykal'naja forma* [Forma musicale], voll. 2, Muzgiz 1934-1936

[60] KITAJGORODSKIJ, A.I.: *Reniksa* Molodaja gvardija, 1967

[61] KORČINSKIJ, E.N.: *K voprosu o teorii kanoničeskoj imitacii* [Della domanda sulla teoria dell'imitazione canonica] Muzgiz, 1960

[62] KOZLOV, P.G., A.A. STEPANOV: *Analiz muzykal'nogo proizvedenija. Učebnoe posobie* [Analisi della produzione musicale. Materiale didattico] Sovietskaja Rossija, 1960

[63] KULAKOVSKIJ, L.V.: *Pesnja, ee jazyk, struktura, sud'by* [La canzone, il suo linguaggio, la struttura, la sorte] Sovetskij kompozitor, 1962

[64] KUPPER, H.: "Computer und Musikwissenschaft" *IBM Nachrichten* 17, 180 (1967)

[65] La musique algorithmique *Bull. informs*, s. a. Num. spec. 28

[66] *Laboratorija muzykal'noj akustiki* [Laboratori di acustica musicale] Muzyka, 1966

[67] LEVELT, W.J.M., J.P. CEER, R. PLOMP: "Triadic comparison of musical intervals" *Brit. J. Math. and Statist. Psychol.* 19, 2 (1966)

[68] LIN, E.: "Wir spielen auf der Rechenanlage" *Gravesaner Blätter* 27-28 (1966) 73-80 (ted.) 81-84 (ingl.)

[69] LOWENSTEIN, P.: "Mozart-Kuriosa" *Zeitschrifte für Musikwissenschaft* 12, 6 (1930)

[70] MACDONALD, N.: "Music by automatic computers" *Computers and Automation* 7, 3 (1958)

[71] MARKOFF, A.A.: "Essai d'une recherche statistique sur le texte du roman 'Eugene Oniegin' " *Bull. Acad. Imper. Sci. St.* 7 (1913)

[72] MATHEWS, M.V., N. GUTTMAN: "Generation of music by a digital computer" *Proc. 3 Internat. Congr. Acoust.* Amsterdam, 1959 pag. 253 e seg.

[73] MATHEWS, M.V.: "An acoustic compiler for music and psychological stimuli" *Bell System Technical Journal* 40, 3 (1961) 677-694

[74] MATHEWS, M.V., J.R. PIERCE, N. GUTTMAN: "Musikalische Klange Von

Digitalrechner" *Gravesaner Blätter* 6, 23-24 (1962) 109-118 (ted.) 119-125 (ingl.)

[75] MAZEL', L.A.: *O melodii* [Sulla melodia] Muzgiz, 1952

[76] MAZEL', L.A.: *Stroenie muzykal'nych proizvedenij* [Struttura delle opere musicali] Muzgiz, 1960

[77] MAZEL', L.A., V.A. ZUKKERMAN: *Analiz muzykal'nich proizvedenij. Elementy muzyki i metodika analiza malych form* [Analisi delle opere musicali. Elementi di musica e metodica dell'analisi delle piccole forme] Muzyka, 1967

[78] MEJLACH, B.S.: a cura di *Simposium po kompleksomu izučeniju chudožestvennogo tvorčestva. Tezisy i annotacii* [Simposio per lo studio complesso della creazione artistica. Tesi e annotazioni] Leningrado, 1963

[79] MEL'ČUK, I.A., R.D. RAVIČ: *Avtomatičeskij perevod 1949-1963. Kritiko-bibliografičeskij spravočnik* [La traduzione automatica 1949-1963. Guida critico-bibliografica] VINITI, Mosca, 1967

[80] MOLES, A.: *Théorie de l'informazion et perception esthétique* Paris: Flammarion, 1958 [tr. it. *Teoria dell'informazione e percezione estetica* Roma: Lerici], [tr. in russo *Teorija informacii i estetičeskoe vosprijatie* Mosca: Mir, 1966]

[81] MOLES, A.: "Das neue Verhältnis zwischen Musik und Matematik" *Gravesaner Blätter* 6, 23-24 (1962) 98

[82] NAZAJKINSKIJ, E.V.: *O muzykal'nom tempe* [Sul tempo musicale] Muzyka, 1965

[83] NAZAJKINSKIJ, E.V., JU. N. RAGS: "O primenenii akustičeskich metodov issledovanija v muzykoznanii" [Sull'impiego dei metodi acustici di ricerca nella musicologia] in *Primenenie akustičeskich metodov issledovanija v muzykoznanii* Muzyka, 1964

[84] NEJGAUZ, G.G.: "Želaju udači" [Desidero il successo] *Sovetskaja muzyka* 3 (1962)

[85] NEST'ES, I.: "Put' I. Dunaevskogo" [Il cammino di Dunaevskij] *Sovetskaja muzyka* 11 (1965)

[86] NEUMANN, P.G., H. SCHAPPERT: "Komponieren mit Elektronischen Rechenautomaten" *Nachrichte Technische Zeitung* 8 (1959) 403

[87] NEWELL, A., J.C. SHAW, H. SIMON: "Empirical explorations with the

Logic Theory Machine" *Proceedings of the Western Joint Compunter Conference* 15 (1957) 218-239 ora in [23] 109-133

[88] NEWELL, A., J.C. SHAW, H. SIMON: "Chess playing programs and the problem of complexity" *IBM Journal of Research and Development* 2 (1958) 320-335 ora in [23] 39-70

[89] NEWELL, A., H. SIMON: "GPS, a program that simulates human thought" in *Lernenden Automaten.* München: Oldenburg, 1961 ora in [23] 279-293

[90] OGOLEVEC, A.S.: *Slovo i muzyka v vokal'no-dramatičeskich žanrach* [Parole e musica nei generi vocalistico-drammatici] Muzgiz, 1960

[91] OLSON, H.F., H. BELAR: "Electronic Music Synthesizer" *The Journal of the Acoustical Society of America* 27 (1955) 595-612

[92] OLSON, H.F., H. BELAR: "Aid to Music Composition Employing a Random Probability System" *The Journal of the Acoustical Society of America* 33 (1961) 1163

[93] PADBERG, M.H.A.: "Computer-composed canon and free fugue" Doctoral dissertation St. Louis University; *Diss. Abstrs* 26, 4 (1965)

[94] PERLE, G.: *Serial composition and atonality (An introduction to the music of Schönberg, Berg and Webern)* Univ. California Press, Berkeley, 1962

[95] PERVIN, JU. A.: "Ob algoritmizacii i programmirovanii igry v domino" *Doklady Akademii Nauk SSSR* 124, 1 (1959) 31-33 e *Problemy kibernetiki* 3 (1960) [tr. ingl. "On algorithms and programming for playing at dominoes" *Automation Express* 1, 8 (1959) 26-28 e "Algorithmization and programming of the game of dominoes" *Problems of Cybernetics* 3 (1962) 957-972]

[96] PINKERTON, R.C.: "Information Theory and Melody" *Scientific American* 194, 2 (1956) 77

[97] PRIEBERG, F.K.: *Musica ex machine* Berlin: Verlag Ullstein, 1960 [tr. it. *Musica ex machina* Torino: Einaudi, 1963]

[98] PUSTYL'NIK, I. JA.: *Praktičeskoe rukovodstvo k napisaniju kanona* [Guida pratica per scrivere un canone] Muzgiz, 1959

[99] PUŠKIN, V.N.: *Operativnoe myslenie v bol'šich sistemach* [Facoltà operative nei massimi sistemi] Energija, 1965

[100] PUŠKIN, V.N.: *Evristika - Nauka o tvorčeskom myšlenii* [Euristica -

Scienza della facoltà creativa] Politizdat, 1967

[101] QUASTLER, H.: *Information Theory - Third London Symposium* London: Butterworth, 1955

[102] RAGS, JU. N.: "Intonirovanie melodii v svjazi s nekotorymi ee elementami" [Intonazione della melodia in relazione ad alcuni suoi elementi] *Trudy kafedry teorii muzyki Mosk. Konservatorii*, Muzgiz, 1960

[103] RAGS, JU. N.: "Akustičeskie metody analiza zvukovysotnoi intonacii v ispolnenii melodii" [Metodi acustici dell'analisi dell'intonazione dell'altezza del suono nell'esecuzione della melodia] in *Voprosy metodiki primenenija techničeskich sredstv i programmirovannogo obučenija* Mosca, 1966

[104] RAGS, JU. N.: "O chudožestvennoj norme čistoj intonacii pri ispolnenii melodii" [Sulla norma artistica dell'intonazione pura durante l'esecuzione della melodia] *Trudy VI Vsesojuznoj akustičeskoj konferencii, sekcija KI10.* Mosca, 1968

[105] REGENER; E.: *A linear music transcription for computer input* Princeton University, 1964

[106] REITMAN, M.: "Programming intelligent problem-solvers" in T. MARILL, ed. Special issue on artificial intelligence *IRE Transaction on Human Factors in Electronics* HFE-2 (1961) 26-33

[107] RETI, R.: *Tonal'nost' v sovremennoj muzyke* Muzyka, 1968 [tr. dall'ingl.]

[108] RISSET, J.C.: "Musique électronique et théorie de l'information" *Onde électrique* 44, 451 (1964) 1055-1063

[109] RYTVINSKAJA, M.S., V.I. ŠARONOV: "Garmonizacija vos'mitaktnych pesennych melodij na EVM" [L'armonizzazione mediante calcolatore delle melodie a otto battute delle canzoni] *Kazanskij Universitet. Učenye Zapiski* 123, 6 (1963)

[110] SACHALTUEVA, O.: "O nekotorych zakonomernostjach intonirovanija v svjazi s formoj dinamikoj i ladom" [Su alcune leggi dell'intonazione in relazione alla forma, alla dinamica e all'armonia] *Trudy kafedry teorii muzyki Mosk. Konservatorii* Muzgiz, 1960

[111] SAMUEL, A.L.: "Some studies in machine learning using the game of checkers" *IBM Journal of Research and Development* 3 (1959) 211-229 ora in [23] 71-105

[112] SCHILLINGER, J.: *The Schillinger system of musical composition* 2 voll. New York: Fischer, 1946

[113] SHANNON, C.E.: *Proc. First London Symposium in Information Theory* London, 1950

[114] SILOV, G.E.: *Prostaja gamma (Ustrojstvo muzykal'noj skaly)* [Gamma semplice (Struttura della scala musicale)] Fizmatgiz, 1963

[115] "Sincopation by Automation" *Data from ElectroData* ElectroData Division of Burroughs Corp., Pasadena, California (August 1956) pp. 2-3

[116] SKREBKOV, S.S.: *Analiza muzykal'nych proizvedenij* [Analisi delle opere musicali] Muzgiz, 1958

[117] SOCHOR, A.N.: *Muzyka kak vid iskusstva* [Musica come aspetto dell'arte] Muzgiz, 1961

[118] SPOSOBIN, I.V.: *Muzykal'naja forma. Učebnik obščego kursa analiza* [La forma musicale. Manuale di un corso generale di analisi] Muzgiz, 1962

[119] STEPANOV, A.M.: "Eksperiment po modelirovaniju struktury polifoničeskoj muzyki strogogo stilja" [Esperimento di simulazione della struttura della musica seria polifonica] in *Estetičeskie očerki* 2 Muzyka, 1967

[120] ŠREJDER, JU. A.: "O semanticeskich aspektach informacii [Sugli aspetti semantici dell'informazione] in *Informacija i kibernetika* Sovetskoe radio, 1967

[121] VENTSEL, E.S.: *Teorija verojatnostej* Fizmatgiz, 1962 [tr. fr. *Théorie des probabilités* Mosca: Mir, 1973]

[122] WANG, H.: "Toward mechanical mathematics" *IBM Journal of Research and Development* 4 (1960) 2-22

[123] WINCKEL, F.: "Die Lautsynthese in der elektronischen Musik" *Phys. Blätter* 18, 4 (1962)

[124] WOODWARD, P.M.: "The synthesis of music and speech" *The Computer Journal* 9, 3 (1966)

[125] XENAKIS, Y.: "Stochastische Musik" *Gravesaner Blätter* 6, 23-24 (1962) 156-168

[126] ZARIPOV, R.CH.: "Ob algoritmičeskom opisanii processa sočinenija muzyki" *Doklady Akademii Nauk SSSR* 132, 6 (1960) 1283-1286 [tr.

ingl. "An algorithmic description of music composing process" *Automation Express* 3 (1960) 17]

[127] ZARIPOV, R.CH.: "O programmirovanii processa sočinenija muzyki" *Problemy kibernetiki* 7 (1962) 151-160

[128] ZARIPOV, R.CH.: "Ural'skie napevy" [Melodie degli urali] *Znanie-Sila* 2 (1961)

[129] ZARIPOV, R.CH.: "Muzična tvorcist' i kibernetika" [Creazione musicale e cibernetica] *Mistecvo* 4 (1962)

[130] ZARIPOV, R.CH.: "Modelirovanie struktury chudožestvennogo proizvedenija" [Simulazione della struttura dell'opera artistica] in [78], 1963

[131] ZARIPOV, R.CH.: *Kibernetika i muzyka* Znanie, 1963 [tr. ingl. "Cybernetic and Music" *Perspective of new music* 7, 2 (1969)]

[132] ZARIPOV, R.CH.: "O modelirovanii melodij zadannogo stilja na cifrovych vycislitel'nych mašinach" [Simulazione di melodie di stile classico su calcolatore] *Problemy kibernetiki* 15 (1965) 157-200

[133] ZARIPOV, R.CH.: "Ob algoritmizacii rešenija zadač po garmonii i analiza garmonizacii" [Sull'algoritmizzazione della soluzione di problemi di armonia e analisi dell'armonizzazione] *Doklady Akademii Nauk SSSR* 166, 5 (1966) 1069-1072

[134] ZARIPOV, R.CH.: "Rešenie zadač po garmonii i analiz garmonizacii na cifrovoj vycislitel'noj mašine" *Problemy kibernetiki* 18 (1967) [tr. ingl. "Solution of harmony problems and analysis of harmonization by digital computer" *Systems Theory Research* 18 (1968) 87-125]

[135] ZARIPOV, R.CH.: "Modelirovanie funkcij kompozitora i muzykoveda na vycislitel'nych mašinach" [Simulazione della funzione del compositore e del musicologo con i calcolatori elettronici] in *Problemy modelirovanija psichičeskoj dejatel'nosti* Novosibirsk, 1967

[136] ZARIPOV, R.CH.: "Ob issledovanii muzykalnych sočinenij kibernetičeskimi i psichoakustičeskimi metodami" [Sulle ricerche delle composizioni musicali con metodi cibernetici e psicoacustici] *Trudy VI Vsesojuznoj akustičeskoj konferencii, sekcija KV5* Mosca, 1968

[137] ZARIPOV, R.CH.: "Musik und Rechenautomaten" *Ideen dex exakten Wissen* 2 (1969)

[138] ZARIPOV, R.CH., V.V. IVANOV: Postfazione dei curatori dell'edizione russa di [80]

[139] ZIELINSKI, G.: "Komputerowa symulacja komponowania musyki" *Prace CO Polska Akademia Nauk.* Varsavia 19 (1970)

[140] ZOLKOVSKIJ, A.K.: "O modelirovanii jazykogovo povedenija slusatelja muzyki" *Tezisy simpoziuma po strukturnomu izuceniju znakovych sistem Akademii Nauka SSSR* Mosca, 1962

Discografia

[141] PIERCE, J.R., M.V. MATHEWS, D. LEWIN, S.D. SPEETH, N. GUTTMANN, J. TENNEY: *Music from mathematics* Decca DL 79103

Bibliografia aggiunta

Questi sono recenti lavori che riguardano la composizione di musica tradizionale mediante macchine elettroniche.

[142] ZARIPOV, R.CH.: "Ob algoritmizacii muzykal'nych variacij" *Doklady Akademia Nauk SSSR* 211 (1973) 551-554

[143] ZARIPOV, R.CH.: "Modelirovanie transpozicii invariantnych otnošenij i muzykal'nych variacij na vyčislitel'noj mašine" *Kybernetika* 9 (1973) 400-421

[144] ZARIPOV, R.CH.: "O modelirovanii chudožestvennogo tvorčestva" in A.I. BERGA *Upravlenie, informacija, intellekt* Mosca: Mysl', 1976 pp. 327-346

[145] ZARIPOV, R.CH.: "Modelirovanie na EVN elementov tvorčestva. Na materiale muzyka" in *Kybernetika* (1977) 3-25

[146] GAGLIARDO, E. e P. FORNASARI: "Composizione di musica classica mediante elaboratore elettronico" *Quaderni di Informatica* n. 2 (1978) 28-31

[147] BERNARDI, M.L., E. GAGLIARDO, G. GILARDI: "Abiomelos 1979. Mathematical Structures for Harmony and Melody" *Rendiconti dell'Istituto Lombardo di Scienze e Lettere* (1979)

[148] HILLER, L.: "Music Composed with Computers. A Historical Survey" in H.B. LINCOLN, a cura di *The Computer and Music* Ithaca and London: Cornell University Press, 1970

Indice analitico

Abiomelos 11
accento 29
accordi 84
– di settima 84
–, frequenza di transizione degli 75
algoritmi 19, 20
altezza di una nota 80
anacrusi 31, 99, 105
analisi statistica 70
apprendimento musicale 19
armonia fondamentale 34
armonica
– funzione 103
– struttura 103
armoniche 76
atonale, musica 35, 66
aurea, sezione 35
automatica
– composizione 47
– sintetizzazione 76

Bach, corali di 75
blocchi, schema a 114

casuali, estrazione di numeri 91
cicli 113
collaborazione tra la macchina e l'uomo 13
combinazione elementare
– di durate 79, 126
– di sillabe 125
composizione automatica 47
– di poesie 21
contrappunto 64, 66
corali di Bach 75
croma 79

distanza, struttura della 104, 106
dodecafonica, musica 35, 66, 71
durata(-e)
–, combinazione elementare di 79, 126
– di una nota 79

estrazione di numeri casuali 91

fondamentale, armonia 34
frasi 31, 32, 99
frequenza
– degli intervalli 72
– delle note 71

– di transizione degli accordi 75
funzione armonica 103

gamma 111
generale, struttura 31, 59
gruppo
– melodico 98
– ritmico 96

informazione 26
intervallare, struttura 99, 105, 106
intervallo(-i) 29, 83
–, frequenza degli 72
–, operazioni sugli 87
–, segno di un 38
intuizione 19, 20, 25
ispirazione 19, 25

linea melodica 29, 38
linguaggio algoritmico musicale 78

maggiore, scala 95
matematico, modello 9, 19
Markov, processi di 47
melodia 25
melodico(-a)
–, gruppo 98
–, linea 29, 38
–, struttura 101, 107
messaggi umani 11
minore armonica, scala 95
modellazione 20
modello matematico 9, 19, 23
modulo 78
musica
– atonale 35, 66
– dodecafonica 35, 66, 71
– tonale 35, 71
musicale
–, apprendimento 19
–, linguaggio algoritmico 78

nota(-e)
–, altezza di una 80
– di sostegno 102, 111
–, durata di una 79
–, frequenza delle 71
numeri
– casuali, estrazione di 91
– pseudocasuali 91

operazioni sugli intervalli 87
ottava 81

pentatonica, scala 34
poesie, composizione automatica di 21
prima 86
processi di Markov 47
pseudocasuali, numeri 91

quinta 86

radice 86
regole matematiche prive di significato musicale 58
ripetizioni 37, 53
ritmico(-a)
–, gruppo 96
–, struttura 100, 107
ritmo 27, 121
– dei versi 121
– della canzone 121, 129
– della melodia 121

salto(-i) 30, 35, 112
scala 34
– maggiore 95
– minore armonica 95
– pentatonica 34
schema a blocchi 114
segno di un intervallo 38, 109
semiminima 79

settima 86
–, accordi di 84
sezione aurea 35
sillabe, combinazione elementare di 125
sincopi 32
sintetizzazione automatica 76
sostegno, nota di 102, 111
statistica, analisi 70
struttura
– armonica 103
– della distanza 104, 106
– generale 31, 59
– intervallare 99, 105, 106
– melodica 101, 107
– ritmica 100, 107

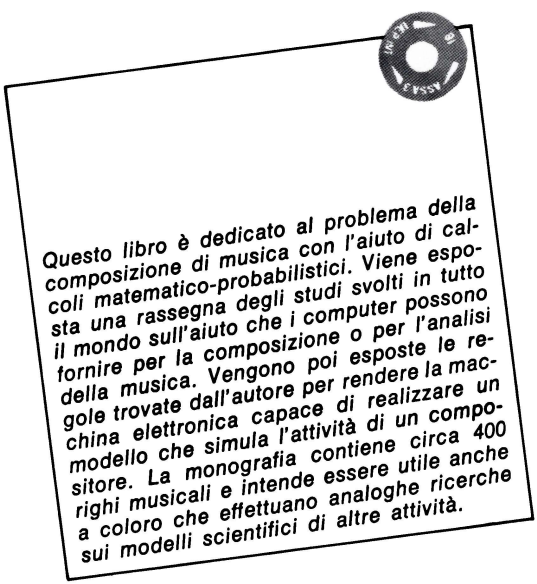
teoria musicale 22
terminazione(-i) 33, 36, 113
terza 86
tipo di composizione 92
tonale, musica 35, 71
tonalità 34, 95
traslazione(-i) 33, 53, 102
triadi 84
tritono 110

umani, messaggi 11
Ural 10, 59
Ural-2 68

valore assoluto 78
variazione(-i) 23, 33, 37, 38

Finito di stampare il 15 ottobre 1979 presso Grafiche Muzzio, Padova
Fotocomposto e impaginato dalla Linotipia Moderna Dorigo, Padova
Printed in Italy

franco muzzio & c. editore



Questo libro è dedicato al problema della composizione di musica con l'aiuto di calcoli matematico-probabilistici. Viene esposta una rassegna degli studi svolti in tutto il mondo sull'aiuto che i computer possono fornire per la composizione o per l'analisi della musica. Vengono poi esposte le regole trovate dall'autore per rendere la macchina elettronica capace di realizzare un modello che simula l'attività di un compositore. La monografia contiene circa 400 righi musicali e intende essere utile anche a coloro che effettuano analoghe ricerche sui modelli scientifici di altre attività.

L. 7.500 (7.075)

ISBN 88-7021-101-1